



Office de la Formation Professionnelle et de la
Promotion du Travail

Technicien Spécialisé

Génie électrique

Électromécanique des Systèmes Automatisés

Manuel de cours

Module 15

Installation et entretien des transformateurs



Edition 2022



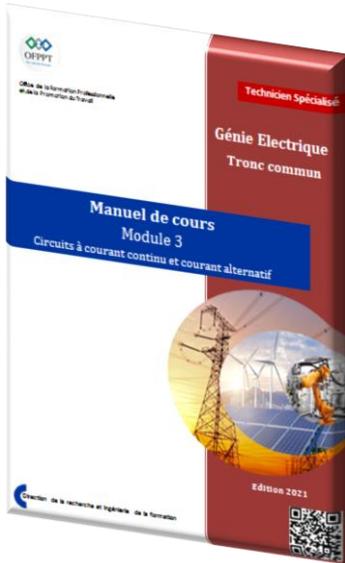
Direction de la Recherche et Ingénierie de la Formation



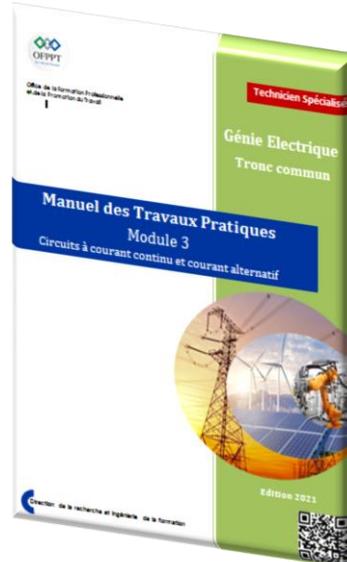
Avant-propos

Les manuels de cours, de travaux pratiques et le guide e-learning sont téléchargeables à partir de la plateforme e-learning moyennant les codes QR suivants :

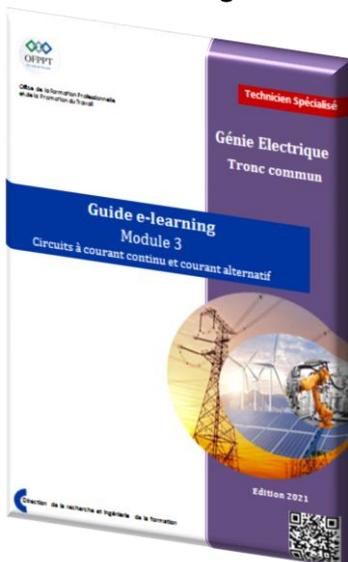
Manuel de cours



Manuel des travaux pratiques



Guide e-learning



SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| AVANT-PROPOS..... | 2 |
| SOMMAIRE..... | 3 |
| COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS | 6 |
| INTRODUCTION | 9 |
| CHAPITRE I..... | 10 |
| 1. UTILITE DU TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE..... | 11 |
| 2. LES DIFFERENTS TYPES DE TRANSFORMATEURS..... | 14 |
| 2.1 Transformateur de puissance..... | 14 |
| 2.2 Autotransformateur..... | 14 |
| 2.3 Transformateur d'isolement | 15 |
| 2.4 Transformateur d'impédance..... | 15 |
| 2.5 Transformateur de mesure | 16 |
| 2.6 Transformateur d'impulsions | 18 |
| 2.7 Symboles des transformateurs..... | 19 |
| 3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU TRANSFORMATEUR | 20 |
| 3.1 Principe..... | 20 |
| 4. TRANSFORMATEUR PARFAIT | 22 |
| 4.1 Équations du transformateur parfait..... | 22 |
| 4.2 Etude énergétique et impédances..... | 24 |
| 4.3 Limite de la théorie du transformateur parfait..... | 25 |
| 4.4 Activités d'apprentissage | 28 |
| 5. TRANSFORMATEUR REEL..... | 32 |
| 5.1 Modèle du transformateur réel | 32 |
| 5.2 Modèle simplifié du transformateur dans l'approximation de Kapp "modèle de Kapp" | 34 |
| 5.3 Bilan de puissance..... | 36 |
| 5.4 Détermination expérimentale des éléments du modèle de Kapp..... | 39 |
| 5.5 Fonctionnement en charge | 42 |
| 5.6 Plaque signalétique..... | 45 |
| 5.7 Activités d'apprentissage | 46 |
| CHAPITRE II..... | 52 |
| 1. INTERET. | 53 |

| | |
|---|-----------|
| 2. CONSTITUTION DU TRANSFORMATEUR TRIPHASE | 53 |
| 2.1 Repérages et notations | 55 |
| 2.2 Coulage des enroulements..... | 55 |
| 3. MODELE D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASE | 58 |
| 3.1 Rapport de transformation | 58 |
| 3.2 Schéma équivalent..... | 58 |
| 3.3 Rendement | 62 |
| 4. DEPHASAGE ET INDICE HORAIRE | 63 |
| 4.1 Détermination de l'indice horaire à partir du schéma | 63 |
| 4.2 Détermination pratique de l'indice horaire | 65 |
| 5. MARCHE EN PARALLELE DE DEUX TRANSFORMATEURS | 68 |
| 5.1 Transformateurs monophasés en parallèle | 68 |
| 5.2 Transformateurs triphasés en parallèle..... | 71 |
| 6. PLAQUE SIGNALÉTIQUE | 74 |
| 7. ACTIVITES D'APPRENTISSAGE | 76 |
| 7.1 Énoncés..... | 76 |
| 7.2 Corrigé | 78 |
| CHAPITRE III..... | 81 |
| 1. GENERALITE | 82 |
| 2. PARTIE ACTIVE | 82 |
| 2.1 Circuit magnétique..... | 82 |
| 2.2 Enroulements..... | 86 |
| 2.3 Régulateur de tension | 88 |
| 2.4 La connectique..... | 90 |
| 3. ISOLATION | 91 |
| 3.1 Transformateur à sec | 91 |
| 3.2 Transformateur immergé..... | 92 |
| 3.3 L'enveloppe | 93 |
| 4. REFROIDISSEMENT DES TRANSFORMATEURS | 94 |
| 4.1 Différentes techniques de refroidissement des transformateurs | 94 |
| 4.2 Symboles du mode de refroidissement | 97 |
| 4.3 Exemple d'installation..... | 98 |
| 5. EQUIPEMENTS AUXILIAIRES | 99 |
| 5.1 Conservateur | 101 |
| 5.2 Relai Buchholz..... | 101 |
| 5.3 Jauge de température | 103 |
| 5.4 Dispositifs de décharge de pression | 103 |

| | | |
|---|--|------------|
| 5.5 | Transformateurs d'instrumentation | 104 |
| CHAPITRE IV | | 106 |
| 1. PROCEDURES D'INSTALLATION | | 107 |
| 1.1 | Emplacement | 107 |
| 1.2 | Ventilation | 107 |
| 1.3 | Câblage d'installation sans armoire | 108 |
| 1.4 | Mise à la terre | 109 |
| 1.5 | Liste de contrôle "checklist" | 109 |
| 2. LES DEFAILLANCES DU TRANSFORMATEUR ELECTRIQUE | | 110 |
| 2.1 | Contrainte diélectrique | 111 |
| 2.2 | Contraintes électrodynamiques et surintensités | 112 |
| 2.3 | Contraintes électriques : mauvais contacts | 113 |
| 2.4 | Contraintes thermiques : surcharges, points chauds et vieillissement | 114 |
| 2.5 | Contraintes électromagnétiques et courants de Foucault | 115 |
| 3. MAINTENANCE DES TRANSFORMATEURS | | 115 |
| 3.1 | Maintenance des composantes externes du transformateur | 115 |
| 3.2 | Maintenance des composantes internes du transformateur | 116 |
| 3.3 | Inspection | 118 |
| 3.4 | Maintenance d'un transformateur inutilisé | 119 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | | 121 |

COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS

Module 15 : Installation et entretien des transformateurs

Code : GEESA-15

Durée : 30 heures

ENONCE DE LA COMPETENCE

Installer et entretenir les transformateurs

CONTEXTE DE REALISATION

- Individuellement

- À partir de :
 - Directives ;
 - Manuels et Fiches techniques ;
 - Schémas, plans, ou croquis ;
 - Abaques ou de tableaux ;

-

- À l'aide de :
 - Bancs de transformateurs monophasé, triphasé
 - Banc didactique de régime de neutre
 - Outils et d'instruments de mesure ;
 - Appareils de contrôle
 - Logiciels de simulation
 - Equipement de protection individuelle.

CRITÈRES GÉNÉRAUX DE PERFORMANCE

- Pertinence de la terminologie utilisée.
- Application correcte des procédures d'installation et de dépannage
- Conformité au cahier des charges
- Fonctionnement correcte de l'installation
- Utilisation correcte des instruments de mesures.
- Précision des mesures
- Respect des tolérances
- Respect des règles de santé et de sécurité au travail.

| ÉLÉMENTS DE LA COMPÉTENCE | CRITÈRES PARTICULIERS DE PERFORMANCE |
|---|--|
| A. Interpréter le cahier des charges des travaux d'installation des transformateurs | <ul style="list-style-type: none"> • Interprétation judicieuse des éléments du cahier des charges et des directives • Description correcte des conditions de services • Interprétation juste de l'information technique relative aux types des transformateurs, leurs caractéristiques et leurs modes de fonctionnement • Interprétation juste des schémas • Interprétation correcte du plan des travaux d'installation |
| B. Choisir les appareillages de protection et de commande nécessaires à l'installation du transformateur de puissance | <ul style="list-style-type: none"> • Sélection minutieuse des dispositifs de protection du circuit de puissance • Choix approprié des dispositifs de commande, des coffrets, des câbles et des canalisations. • Choix approprié de l'outillage. |
| C. Installer un transformateur de puissance | <ul style="list-style-type: none"> • Détermination judicieuse des modes de fixation • Choix judicieux de l'emplacement du transformateur, de la boîte de commande, du tableau et des canalisations. • Respect de la technique de fixation. • Installation correcte des câbles et des canalisations. • Repérage conforme des conducteurs. • Respect des procédures de mise en service • Respect des procédures de démarrage |
| D. Réaliser des travaux de maintenance des transformateurs | <ul style="list-style-type: none"> • Planification judicieuse des travaux de maintenance préventive et corrective • Vérification minutieuse des réglages et des paramètres de fonctionnement • Diagnostic correct des défaillances des transformateurs • Recherches minutieuses des causes de dysfonctionnement sur banc et schémas • Utilisation correcte des appareils de contrôle • Précision des mesures • Sélection juste des outils de travail • Changement correct des pièces endommagés (joints, garnitures ...) |

| ÉLÉMENTS DE LA COMPÉTENCE | CRITÈRES PARTICULIERS DE PERFORMANCE |
|--|--|
| E. Vérifier la qualité des travaux d'installation des transformateurs de puissance | <ul style="list-style-type: none">• Conformité de l'installation au cahier des charges• Respect de la procédure de mise sous tension et de démarrage.• Vérification appropriée de la tension, du courant et de la puissance.• Vérification appropriée du fonctionnement des commandes, des relais de commande ou des commandes électroniques.• Respect des règles de santé et de sécurité• Rangement et nettoyage approprié de l'aire de travail.• Rédaction correcte du rapport d'installation ou de la fiche d'intervention. |

Introduction

Selon la commission électrotechnique internationale (CEI) un transformateur est un "*appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre de la puissance électrique*". Il se compose d'un ou plusieurs enroulements de fil enroulés autour d'un noyau ferromagnétique commun.

Le transformateur est un passage obligé dans la chaîne de transmission de l'énergie électrique, de plus la consommation d'électricité augmentant continuellement, les transformateurs existants sont de plus en plus chargés. Bien qu'ils présentent peu de pannes majeures, lorsque c'est le cas, l'indisponibilité qu'elles provoquent est généralement extrêmement problématique. Les transformateurs sont utilisés dans la distribution et le transport de l'énergie électrique depuis la création de la génération de courant alternatif, il y a plus d'un siècle. Bien que les principes de fonctionnement des transformateurs restent les mêmes, les défis de maintenance et de test des transformateurs ont évolué avec la conception et la construction des transformateurs. Les transformateurs modernes sont conçus avec des tolérances plus étroites que leurs ancêtres. Ainsi, une maintenance et des tests efficaces et réguliers sont encore plus essentiels pour un fonctionnement continu

Chapitre I

PRINCIPES FONDAMENTAUX DES TRANSFORMATEURS ELECTRIQUES

1. Utilité du transformateur de puissance

Un transformateur est une machine statique qui assure la conversion d'une tension alternative à une autre tension alternative mais de même fréquence avec un excellent rendement. Il se compose d'un ou plusieurs enroulements de fil enroulés autour d'un noyau ferromagnétique commun.

Habituellement, ces enroulements ne sont pas reliés électriquement. Ils sont reliés par le flux magnétique commun. Conformément au genre du courant on distingue, les transformateurs monophasés (fig. 1.1), triphasés (fig. 1.2) et polyphasés.



Figure.1.1 : Transformateur monophasé



Figure.1.2 : Transformateur triphasé

La fonction de transformateur est basée sur le principe que l'énergie électrique est transférée efficacement par induction magnétique d'un circuit à une autre. Lorsqu'un enroulement d'un transformateur est alimenté à partir d'une source de courant alternatif (CA), un champ magnétique alternatif est établi dans le noyau du transformateur. Des lignes de force magnétiques alternées, appelées « flux », circulent à travers le noyau. Avec un deuxième enroulement autour du même noyau, une tension est induite par les lignes de flux alternatif (loi de Lenz). Un circuit, connecté aux bornes du deuxième enroulement, entraîne la circulation du courant. Par principe de fonctionnement, **le transformateur est une machine réversible.**

Les transformateurs sont des appareils robustes qui ont pour rôle de transiter l'énergie électrique d'un réseau à un autre (fig. 1.3). En effet, pour des raisons économiques, le courant alternatif est transmis à de très hautes tensions, par exemple 400 kV ou 225 kV sur de longues distances. La production de l'énergie électrique et son transport se fait généralement en triphasé. Par ailleurs on démontre facilement que le transport de l'énergie en haute tension est plus économique. La tension délivrée par les alternateurs est insuffisante pour assurer le transport de l'énergie électrique avec un bon rendement d'où la nécessité d'employer des transformateurs élévateurs à la sortie de centrale de production et abaisseur tout proche des centres de consommation. Au Maroc les tensions adoptées pour *le transport* de l'énergie

électrique sont 400 kV et 225 kV et le *réseau de distribution* d'énergie électrique est alimenté à partir des transformateurs 20 kV / 400 V (HT-A / BT).

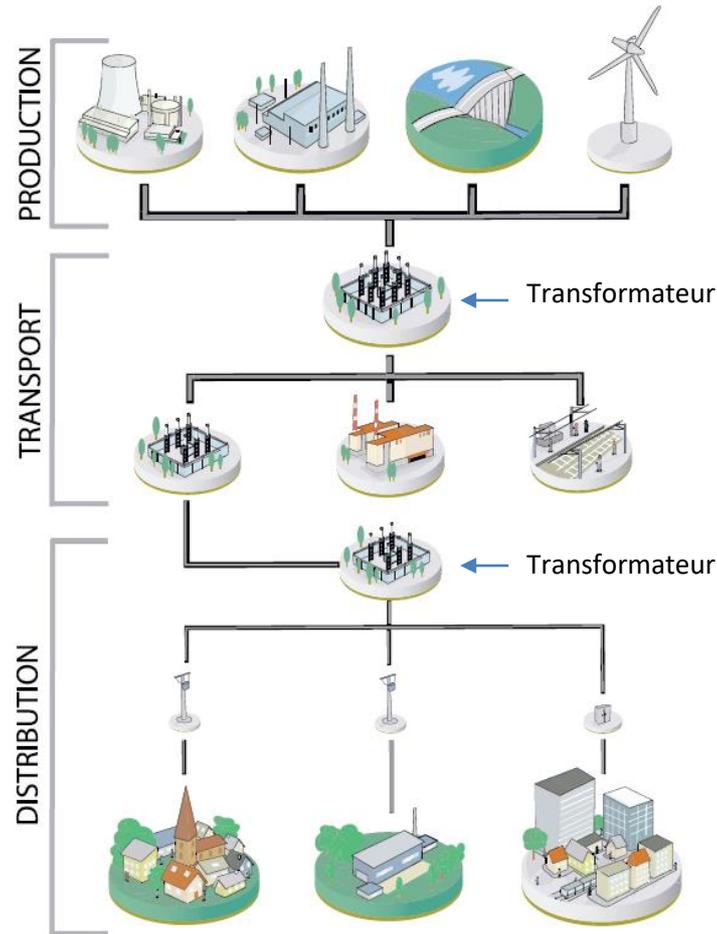


Figure 1.3. Réseau électrique

Le réseau de transport et d'interconnexion partant des centrales électriques est dédié au transport de l'électricité sur de longue distance, il est constitué de lignes très haute tension (THT) à 400 kV, 225 kV ou 150 kV.

Le réseau de répartition, réseau intermédiaire dédié aux distances moyennes (quelques dizaines de kilomètres) et constitué de lignes haute tension (HT) à 90 et 60 kV,

Le réseau de distribution amenant l'énergie électrique aux abonnés, il comporte des lignes moyenne tension (MT) à 20 kV, auxquelles peuvent être relié directement les utilisateurs industriels, et des lignes basse tension (BT) à 230 V en monophasé ou en triphasé (réseau 230/400 V) à quatre fils pour la distribution au particulier.

Un autre rôle important des transformateurs insérés dans les réseaux d'énergie est leur contribution au réglage du niveau de tension en fonction des conditions de charge du réseau (transformateur de réglage ou régulateur de charge). Ceci est réalisé par modification de leur

rapport de transformation au moyen de changeur de prise permettant de rajouter ou de retrancher des spires à l'enroulement principal du transformateur. Le rapport de transformation du transformateur peut ainsi être adapté aux conditions de charge sur le réseau afin de maintenir la tension à un niveau optimal. Il peut être utilisé tant comme transformateur élévateur que comme transformateur abaisseur.

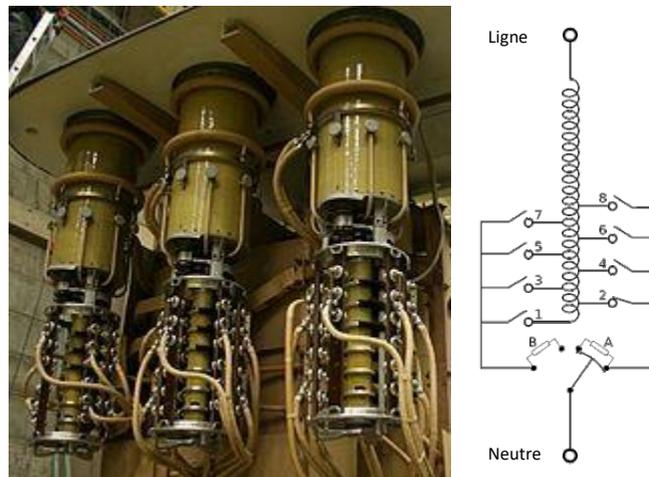


Figure 1.4. Changeur de prise

La figure 1.4 montre 3 Changeurs de prises (1 par phase) pour un transformateur de forte puissance. Le sélecteur est la partie basse où sont connectés les câbles, il permet huit combinaisons possibles. Le commutateur se trouve dans le cylindre de la partie haute.

Les transformateurs de puissance peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leurs applications :

- Les transformateurs élévateurs sont situés dans les postes de départ d'une centrale, leur rôle est d'élever la tension produite à partir des générateurs, afin de minimiser les pertes sur les lignes.
- Les transformateurs d'interconnexions font passer l'électricité d'un niveau de transport plus élevé à une tension de répartition moins élevée afin de faciliter sa distribution dans les postes régionaux.
- Les transformateurs abaisseurs, se trouvent au niveau des postes électriques afin d'adapter la tension électrique de transport aux différentes tensions de distributions.
- Les transformateurs de distribution sont utilisés pour abaisser la tension et l'adapter à l'utilisateur à des fins domestiques ou industrielles.

Outre L'utilisation des transformateurs pour le transport et la distribution de l'énergie électrique, Les transformateurs sont utilisés là où l'adaptation du niveau de tension en courant alternatif à fréquence industrielle (50Hz - 60Hz) est indispensable, allant des transformateurs de puissance à ceux de quelques Voltampères (fig. 1.5).



Figure 1.4. Transformateur de faible puissance (de gauche à droite : Transformateur torique, transformateur R-core et transformateur cuirassé)

2. Les différents types de transformateurs

Ces distinctions sont souvent liées aux très nombreuses applications possibles des transformateurs

2.1 Transformateur de puissance

Les transformateurs sont l'un des principaux composants pour la transmission et la distribution de l'énergie électrique (Évoqué dans la première partie de ce cours).

Les transformateurs qui sont directement connectés au générateur de la centrale électrique sont appelés transformateurs de générateur.

La connexion entre les différents niveaux du réseau haute tension s'effectue via des transformateurs de réseau (transformateurs d'interconnexion de réseau).

Les transformateurs de distribution ils distribuent l'énergie électrique aux consommateurs en alimentant à partir de la haute tension le réseau de distribution basse tension.

2.2 Autotransformateur

Il s'agit d'un transformateur sans isolement entre le primaire et le secondaire.

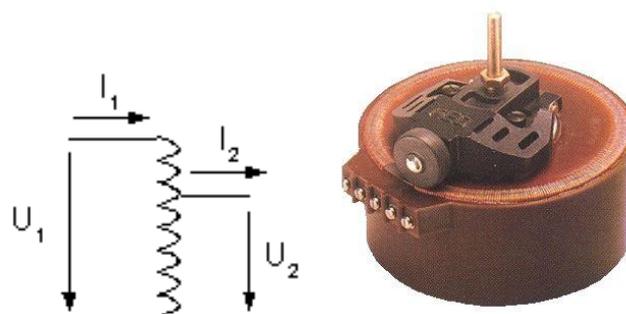


Figure 1.5. Autotransformateur

Dans cette structure, le secondaire est une partie de l'enroulement primaire (fig. 1.5). Le courant alimentant le transformateur parcourt le primaire en totalité et une dérivation à un point donné de celui-ci détermine la sortie du secondaire. Le rapport entre la tension d'entrée et la tension de sortie est identique à celui du type isolé.

A rendement égal, un autotransformateur occupe moins de place qu'un transformateur ; cela est dû au fait qu'il n'y a qu'un seul bobinage, et que la partie commune du bobinage unique est parcourue par la différence des courants primaire et secondaire. L'autotransformateur n'est intéressant que lorsque les tensions d'entrée et de sortie sont du même ordre de grandeur : par exemple, 230V/115V. Il présente cependant l'inconvénient de ne pas présenter d'isolation galvanique entre le primaire et le secondaire (c'est-à-dire que le primaire et le secondaire sont directement connectés), ce qui peut présenter des risques du point de vue de la sécurité des personnes.

2.3 Transformateur d'isolement

Le transformateur d'isolement est uniquement destiné à créer un isolement électrique entre plusieurs circuits pour des raisons bien souvent de sécurité ou de résolution de problèmes techniques. Tous les transformateurs à enroulement primaire isolé du (des) secondaire(s) devraient être considérés comme des transformateurs d'isolement ; toutefois, en pratique, ce nom désigne des transformateurs dont la tension de sortie à la même valeur efficace que celle de l'entrée. Ils sont, par exemple, largement utilisés dans les blocs opératoires : chaque salle du bloc est équipée de son propre transformateur d'isolement, pour éviter qu'un défaut qui y apparaîtrait n'engendre des dysfonctionnements dans une autre salle. Un autre intérêt est de changer de régime de neutre (cas d'utilisation d'équipements informatiques et/ou électroniques sensibles dans une installation IT).

2.4 Transformateur d'impédance

Le transformateur est toujours un transformateur d'impédance, mais les électroniciens donnent ce nom aux transformateurs qui ne sont pas utilisés dans des circuits d'alimentation.

Le transformateur d'impédance est principalement destiné à adapter l'impédance de sortie d'un amplificateur à sa charge.

Ce genre de transformateur était en particulier employé.

- Dans la restitution sonore, pour adapter la sortie d'un amplificateur audio à lampes (haute impédance), avec les haut-parleurs destinés à la restitution du son et caractérisés par une impédance basse.
- En électronique audio professionnelle, on utilise toujours des transformateurs pour les entrées et sorties d'appareils haut de gamme, ou bien dans la fabrication de " Di-box " ou boîte de direct. Le transformateur est alors utilisé, non seulement pour adapter

l'impédance et le niveau de sortie des appareils (synthétiseurs, basse électrique, etc) aux entrées micro (fig. 1.6) de la console de mixage mais en outre pour symétriser la sortie des appareils connectés.

- En technique des hautes fréquences, on utilise également des transformateurs dont le circuit magnétique est en ferrite ou sans circuit magnétique (aussi appelé transformateur sans noyau) pour adapter les impédances de sortie d'un amplificateur, d'une ligne de transmission et d'une antenne. En effet, pour un transfert optimal de puissance de l'amplificateur vers l'antenne, il faut que le taux d'ondes stationnaires (TOS) soit égal à 1.



Figure 1.6. Transformateur d'impédance pour micro

Les transformateurs utilisés en électronique en moyennes et haute fréquence, malgré qu'ils reposent sur le même principe de fonctionnement, sont technologiquement différents (ils ne font pas partie de ce cours).

2.5 Transformateur de mesure

Un transformateur de mesure est un transformateur destiné à alimenter des appareils de mesure, des compteurs, des relais et autres appareils analogues. Ils sont utilisés pour permettre la mesure de la tension ou du courant quand ceux-ci sont trop élevés pour être mesurés directement. Ils doivent transformer la tension ou le courant de manière proportionnelle et sans déphasage.

On distingue deux types de transformateur de mesure

2.5.1 Transformateur de courant



Figure 1.7. TC pour cellule 36 kV

Le transformateur de courant (TC), appelé aussi transformateur d'intensité (TI), est dédié à l'adaptation des courants mis en jeu dans des circuits différents mais fonctionnellement interdépendants (fig1.7).

Un tel transformateur autorise la mesure des courants alternatifs élevés. Il possède une spire au primaire, et plusieurs spires au secondaire : le rapport de transformation permet l'usage d'un ampèremètre classique pour mesurer l'intensité au secondaire, image de l'intensité au primaire pouvant atteindre plusieurs kiloampères (kA).

Le primaire du transformateur du courant (fig. 1.8) est monté en série dans la ligne où l'on veut mesurer le courant.

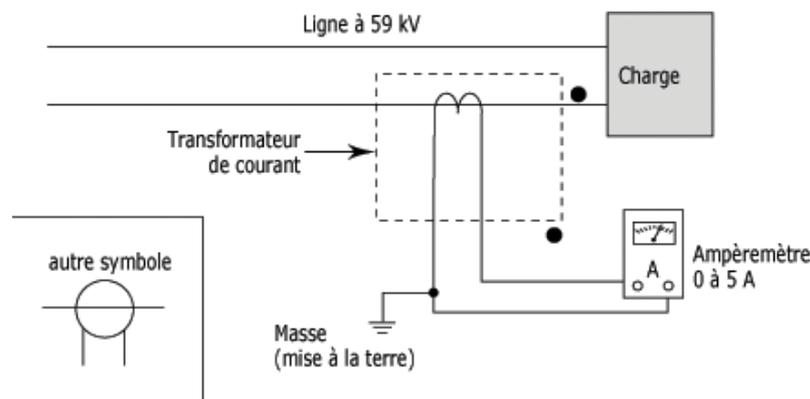


Figure 1.8. Mesure de courant à travers un TC

2.5.2 Transformateur de potentiel

Ce transformateur est l'un des moyens pour mesurer des tensions alternatives élevées. Il s'agit d'un transformateur qui a la particularité d'avoir un rapport de transformation étalonné avec précision, mais prévu pour ne délivrer qu'une très faible charge au secondaire, correspondant à un voltmètre. On le rencontre en HTA et HTB.

Grâce au transformateur de potentiel, on peut employer un instrument standard pour mesurer des tensions très élevées de l'ordre de milliers de volts. Ainsi, ce type de transformateur permet, par exemple, à un voltmètre de calibre 0 - 150 V de mesurer une tension aussi élevée que 13 200 volts (fig. 1.9).

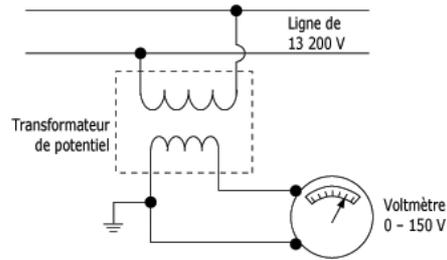
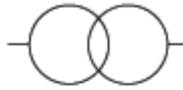
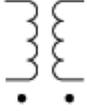
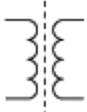
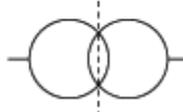
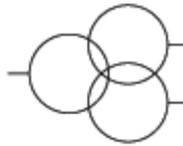
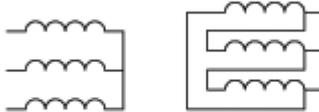


Figure 1.9. Transformateur de potentiel servant à mesurer une tension élevée

2.6 Transformateur d'impulsions

Ce type de transformateur est utilisé pour la commande des thyristors, triacs et des transistors. Il présente, par rapport à l'optocoupleur, les avantages suivants : fonctionnement possible à fréquence élevée, simplification du montage, possibilité de fournir un courant important, bonne tenue en tension.

2.7 Symboles des transformateurs

| | | |
|---|---|---|
| Monophasé à deux enroulements |  |  |
| Avec indicateurs de polarités instantanées des tensions |  | |
| Avec écran |  |  |
| Monophasé à trois enroulements |  |  |
| Triphasé couplage étoile - triangle |  |  |
| Autotransformateur |  |  |
| Transformateur de courant |  |  |

3. Principe de fonctionnement du transformateur

3.1 Principe

Le transformateur est constitué de deux bobines couplées entourant un noyau de fer. Une première bobine soumise à une tension est appelée **primaire**. La première bobine génère un champ magnétique qui est **conduit par le noyau de fer** (Fig. 1.10).

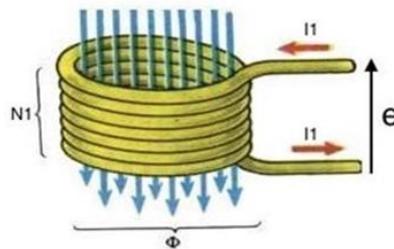


Figure 1.10. flux magnétique

Les **variations** de champ magnétique vues par l'autre bobine, appelée **secondaire**, génèrent une **tension induite**. Pour avoir une bonne transmission de l'énergie le couplage doit être aussi serré que possible ; pour cela les deux bobines sont placées sur un même circuit magnétique de forte perméabilité relative (bon matériau magnétique). Pour minimiser les fuites magnétiques les deux bobines sont souvent placées l'une au-dessus de l'autre.

La figure 1.11 représente un transformateur de type cuirassé pour lequel les deux bobines sont placées sur un noyau central.

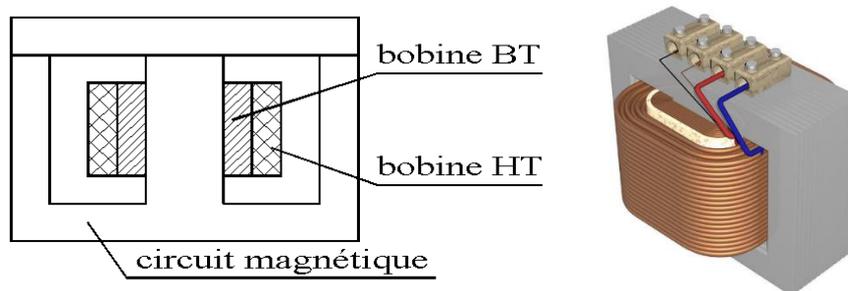


Figure 1.11 : Transformateur monophasé de type cuirassé

Pour avoir un schéma plus lisible, nous représentons les deux bobines séparées (fig.1.12). Définissons sur ce schéma les conventions de signes utilisées pour l'étude du transformateur

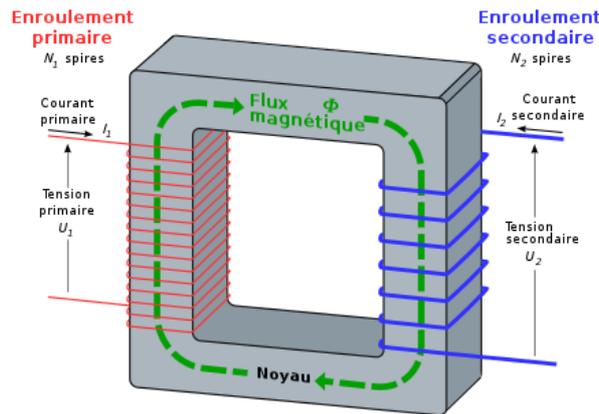


Figure 1.12 : Schéma de principe d'un transformateur monophasé

Où :

U_1 : tension primaire, parfois aussi noté U_p

U_2 : tension secondaire, parfois aussi noté U_s

N_1 : nombre de spires de l'enroulement primaire, parfois aussi noté N_p

N_2 : nombre de spires de l'enroulement secondaire, parfois aussi noté N_s

Φ (phi) : flux magnétique.

Définissons sur le schéma de la figure 1.12 les conventions de signes utilisées pour l'étude du transformateur :

- Orienter le flux Φ dans un sens arbitraire.
- Orienter les courants : le sens positif des courants correspond à celui qui fait circuler un flux positif. Nous utilisons la règle du tire-bouchon pour orienter les courants.
- Orienter les tensions : le primaire reçoit de l'énergie du réseau, nous utilisons donc une convention récepteur au primaire. Le secondaire fournit de l'énergie à la charge, nous utilisons donc une convention générateur au secondaire.

4. Transformateur parfait

Un transformateur parfait, ou idéal, est un transformateur virtuel sans aucune perte. Dans ce cas

- le circuit magnétique est parfait, c'est à dire linéaire, de réluctance nulle et sans pertes magnétiques ;
- les bobinages sont parfaits: résistances nulles et fuites magnétiques nulles.

Le primaire du transformateur est alimenté par une tension sinusoïdale U_1 de fréquence f . Le circuit étant linéaire, toutes les grandeurs sont sinusoïdales de fréquence f . La bobine primaire comporte N_1 spires et la bobine secondaire N_2 spires.

4.1 Équations du transformateur parfait

4.1.1 Equations aux Tensions et aux forces électromotrices (fem)

Soit les flux à travers la section droite du circuit, respectivement φ dans le circuit magnétique, φ_1 dans la bobine primaire et φ_2 dans la bobine secondaire.

Les fuites étant nulles, il vient : $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$.

La liaison du flux est représentée par la loi de Faraday de l'induction électrométrique. La f.é.m. induite, comptée positivement dans le sens du courant, est :

- dans la bobine primaire $e_1 = -N_1 \cdot d\varphi/dt$ et $e_1 = -u_1$
- dans la bobine secondaire $e_2 = -N_2 \cdot d\varphi/dt$ et $e_2 = u_2$

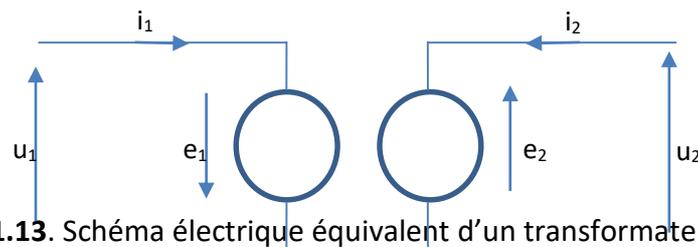


Figure 1.13. Schéma électrique équivalent d'un transformateur idéal

Le flux étant sinusoïdale : $\varphi(t) = \varphi_{Max} \sin \omega t$

Et la fem induite par spire est :

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = -\varphi_{Max} \omega \cos \omega t = \varphi_{Max} \omega \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

L'équation ci-dessus peut être écrite ainsi :

$$e = E_{Max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ où } E_{Max} = \varphi_{Max} \omega$$

Pour une onde sinusoïdale, la valeur efficace de la fem e est donnée par :

$$E = \frac{E_{Max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \varphi_{Max} = 4.44 f \varphi_{Max}$$

Où f est la fréquence en Hertz, $f = \omega/2\pi$

L'induction magnétique dans le circuit magnétique est $b = \varphi / S$, S étant l'aire de la section droite du circuit magnétique ; il vient :

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f S B_{Max} = 4.44 f S B_{Max}$$

- B : Induction magnétique variable en Tesla.
- S : Surface de la section droite du circuit magnétique en m^2 .

Cette relation, dite formule de Boucherot montre que le champ magnétique, donc le flux, est imposé pour une bobine donnée par la tension d'alimentation (E , f). Nous dirons que le flux est forcé par la tension.

Les fem deviennent :

- Au primaire : $E_1 = 4.44 N_1 f \varphi_{Max}$
- Au secondaire : $E_2 = 4.44 N_2 f \varphi_{Max}$

D'après la loi de mailles appliquée au schéma électrique équivalent (fig. 1.3)

- au primaire : $e_1 = -u_1$
- au secondaire : $e_2 = u_2$

En combinant les équations au primaire et au secondaire, nous en déduisons :

$$e_2/e_1 = N_2/N_1 = m.$$

Nous avons donc : $u_2/u_1 = -e_2 / e_1 = -m$.

En valeur efficace : $U_2 / U_1 = m$, rapport du nombre de spires appelé rapport de transformation. Le signe (-) du rapport des tensions instantanées signifie que u_2 et u_1 sont en opposition de phase.

Selon la valeur du rapport de transformation m , on peut distinguer :

- $m=1$: le transformateur est un isolateur
- $m<1$: le transformateur est dit abaisseur
- $m>1$: le transformateur est dit élévateur

4.1.2 Equations aux intensités

D'après la loi d'Hopkinson appliquée au schéma magnétique équivalent, on aura

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = \mathcal{R} \varphi$$

Si on considère le fer parfait, la perméabilité du matériau μ très grande, donc la réluctance du circuit magnétique $\mathfrak{R} \approx 0$. On en déduit que : $N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0$

donc $m = N_2/N_1 = -i_1/i_2$ et $i_1 = -m i_2$. Le signe (-) signifie que i_1 et i_2 sont en opposition de phase.

En valeurs efficaces on aura : $m = I_1/I_2$

4.1.3 Diagramme vectoriel

Les grandeurs primaires et secondaires u_1, i_1, u_2 et i_2 sont toutes sinusoïdales : on peut introduire leurs vecteurs de Fresnel (fig. 1.14).

Les tensions u_1 et u_2 sont en opposition de phase et ont des valeurs efficaces U_1 et U_2 telles que $U_2/U_1 = m$. De même les courants i_1 et i_2 sont en opposition de phase et ont des valeurs efficaces I_1 et I_2 telles que $I_2/I_1 = 1/m$.

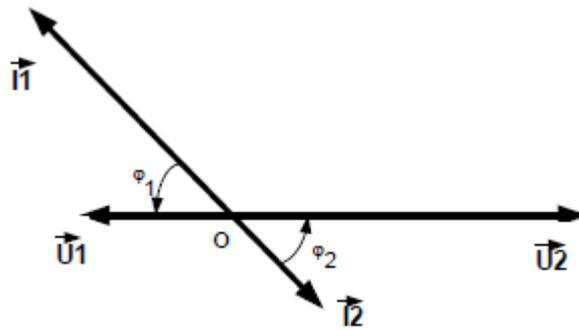


Figure 1.14. Diagramme vectorielle d'un transformateur parfait

4.2 Étude énergétique et impédances

4.2.1 Bilan énergétique

Le bilan des puissances est simple : la charge au niveau du secondaire impose un déphasage φ entre les tensions et courants du secondaire et par conséquent entre la tension et le courant du primaire.

Comme le transformateur est parfait, il n'y a pas de pertes de puissances active ou réactive dans le transformateur.

$$P_1 = U_1.I_1.\cos\varphi_1 = P_2 = U_2.I_2.\cos\varphi_2$$

$$\text{et } \varphi_1 = \varphi_2$$

$$Q_1 = Q_2 = U_2.I_2.\sin\varphi_2 = U_1.I_1.\sin\varphi_1$$

$$S_1 = U_1.I_1 = U_2.I_2 = S_2.$$

Les puissances active et réactive absorbées sont intégralement transmises au récepteur alimenté par le secondaire du transformateur.

Le transformateur parfait ne présente aucune perte : son rendement est de 100%.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1$$

4.2.2 Transfert d'impédance

Le secondaire étant chargé par une impédance Z_u , il vient :

$$u_2/i_2 = Z_u$$

Avec les relations de transformation :

$$U_2 = -m u_1 \text{ et } i_2 = -i_1/m$$

$$\text{Alors } (-m \cdot u_1) / (-i_1/m) = Z_u \quad \text{soit} \quad u_1/i_1 = Z_u/m^2.$$

Le réseau alimentant le primaire "voit" l'impédance équivalente $Z_p = Z_u/m^2$ dite **impédance ramenée au primaire**.

Inversement, une impédance Z_p placée au primaire aura le même effet que l'impédance équivalente $Z_s = m^2 \cdot Z_p$ placée au secondaire.

Le transformateur a donc la propriété de modifier l'impédance vue du primaire ou du secondaire ; cette propriété donne une application du transformateur en électronique pour adapter une charge à un générateur, par exemple l'impédance faible d'un haut-parleur au dernier étage amplificateur d'un poste radio.

Lorsque l'on transfère une impédance à travers un transformateur, il faut, pour avoir l'équivalence :

- en passant du secondaire au primaire on divise Z_s par le carré du rapport de transformation m^2 ;
- en passant du primaire au secondaire on multiplie Z_p par m^2 .

$$Z_s = Z_p \cdot m^2 \quad \text{et} \quad \frac{Z_s}{m^2} = Z_p$$

4.3 Limite de la théorie du transformateur parfait

Deux essais permettent de conclure sur la validité du modèle du transformateur parfait.

On utilise un rhéostat ($R = 110\Omega$) et un transformateur monophasé ayant les caractéristiques suivantes :

- 220V/110V - 50Hz
- $S_n = 450VA$

- $I_{1n}=2.5A$ et $I_{2n}=5A$

4.3.1 Essai à vide P_{10}

On mesure, conformément à la figure 1.15, les tensions U_{20} et U_1 , le courant primaire I_{10} et la puissance active P_{10} .

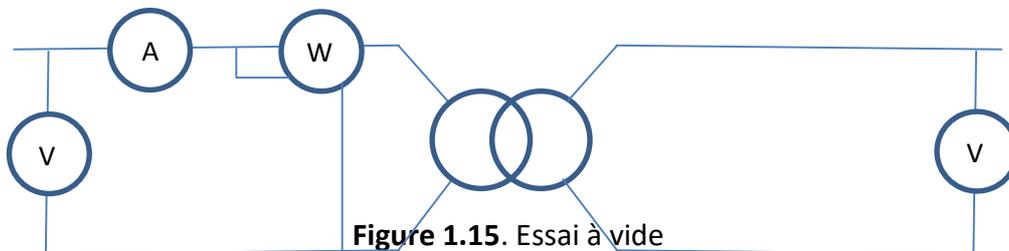


Figure 1.15. Essai à vide

Les mesures donnent les résultats suivants :

- $I_{10} = 0,32 A$
- $P_{10} = 25W$
- $U_{20} = 102V$
- $m = U_{20}/U_{1n} = 0.464$

Constatation pratique :

- le rapport de transformation $m = U_{20}/U_1 = N_2/N_1$ d'un transformateur réel reste le même que celui du transformateur parfait ;
- un courant magnétisant I_{10} , différent de zéro, circule dans le primaire du transformateur réel. Mais, il reste négligeable par rapport au courant nominal I_{1n} ;
- le transformateur réel absorbe une puissance P_{10} dont la valeur relative reste négligeable par rapport à la puissance nominale. La puissance P_{10} représente les pertes à vide du transformateur.

4.3.2 Fonctionnement en charge

Le primaire étant soumis à la tension nominale le transformateur est chargé progressivement (par exemple, à l'aide d'un rhéostat) à fin d'obtenir différentes valeurs du courant secondaire I_2 (fig. 1.16) :

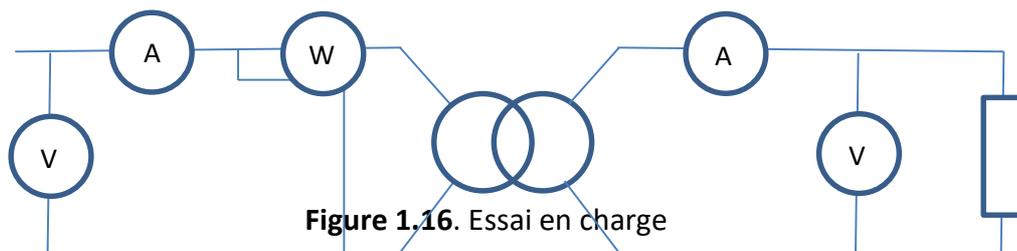


Figure 1.16. Essai en charge

On mesure U_2 , P_1 et P_2 puis on calcule le rapport U_2/U_1 , le rendement η et la chute de tension ΔU_2 .

Avec : $\Delta U_2 = U_{20} - U_2$ et $\eta = P_2/P_1$

Les mesures donnent, pour $U_1 = 220V$, les résultats suivants :

| I(A) | 0 | 0.9 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4.1 | 4.5 | 4.8 |
|-----------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_1(W)$ | 25 | 112.5 | 165 | 210 | 260 | 305 | 350 | 390 | 412.5 | 435 |
| $P_2(W)$ | 0 | 82.5 | 130 | 172.5 | 212.5 | 250 | 290 | 325 | 345 | 360 |
| $U_2(V)$ | 102 | 101 | 99 | 98 | 96 | 95 | 93 | 90 | 86 | 84 |
| $\Delta U_2(V)$ | 0 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 9 | 12 | 16 | 18 |
| η | 0 | 0.733 | 0.788 | 0.7821 | 0.817 | 0.820 | 0.829 | 0.833 | 0.836 | 0.828 |
| U_2/U_1 | 0.464 | 0.459 | 0.45 | 0.445 | 0.436 | 0.431 | 0.423 | 0.409 | 0.391 | 0.382 |

Les figures 1.17 et 1.18 représentent respectivement l'évolution de la tension au secondaire U_2 et la chute de tension secondaire ΔU_2 en fonction du courant de charge I_2 .

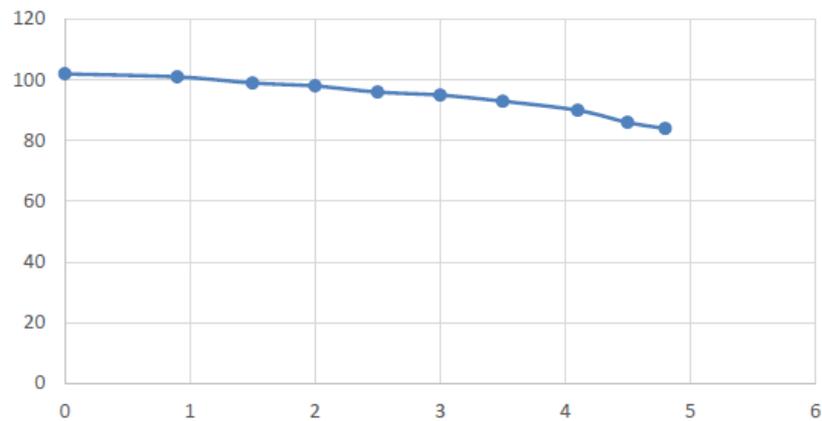


Figure 1.17. Tension U_2 en fonction de I_2

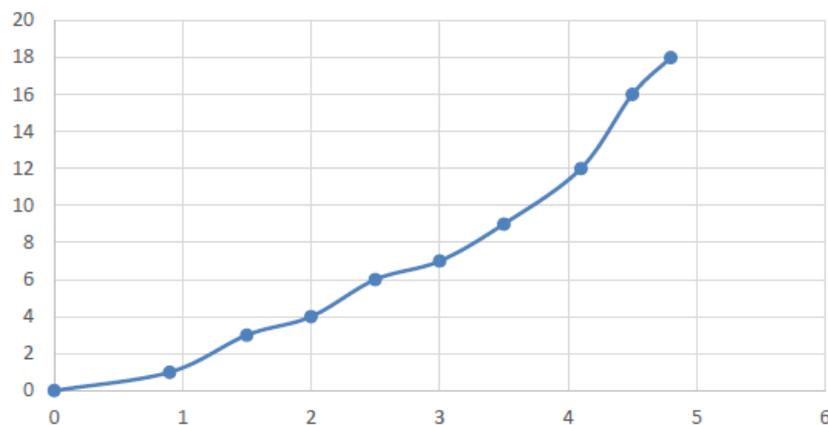


Figure 1.18. Chute de tension secondaire ΔU_2 en fonction de I_2

Les résultats d'un transformateur réel en charge montrent :

- la tension délivrée au secondaire U_2 chute légèrement avec l'augmentation de la charge, cas d'une charge résistive ;
- au voisinage du courant nominale I_{1n} la relation $I_1 = m.I_2$ est vérifiée. Mais pas pour les faibles charges ;
- Contrairement au cas du transformateur parfait le rendement du transformateur $\eta = P_2/P_1$ reste bon, mais inférieur à 100%.

4.3.3 Conclusion

Le modèle de transformateur idéal est développé en considérant que les enroulements du transformateur sont purement inductifs et que le noyau du transformateur est sans pertes. De plus, il n'y a aucune fuite des lignes de champ magnétique du transformateur. Cela signifie que 100 % du flux traverse le noyau et se lie aux enroulements primaire et secondaire du transformateur. Bien que chaque enroulement ait une résistance inhérente, ce qui provoque une chute de tension et une perte par effet Joule. Dans un tel modèle de transformateur idéal, les enroulements sont considérés comme idéaux (entièrement inductifs), ce qui signifie que la résistance de l'enroulement est nulle.

Le modèle du transformateur parfait n'est pas précis, mais il permet une caractérisation rapide du transformateur.

4.4 Activités d'apprentissage

4.4.1 Enoncées

Exercice 1.

Le rapport de transformation d'un transformateur parfait est égal à 0,127.

- 1- Calculer la valeur efficace de la tension secondaire lorsque $U_1 = 220$ V.
- 2- L'enroulement secondaire comporte 30 spires, quel est le nombre de spire au primaire.
- 3- En charge, le primaire absorbe une intensité efficace de 0,5 A. calculer la valeur efficace du courant au secondaire.

Exercice 2.

La mesure des valeurs efficaces des tensions primaire et secondaire d'un transformateur parfait a donné : $U_1 = 230$ V, $U_{20} = 24$ V

- 1- Calculer :
 - le rapport de transformation
 - le nombre de spires au secondaire si $N_1 = 1030$.
- 2- Le secondaire débite 2,5 A dans une charge inductive de facteur de puissance égal à 0,8. Calculer l'intensité efficace I_1 et les différentes puissances du primaire.

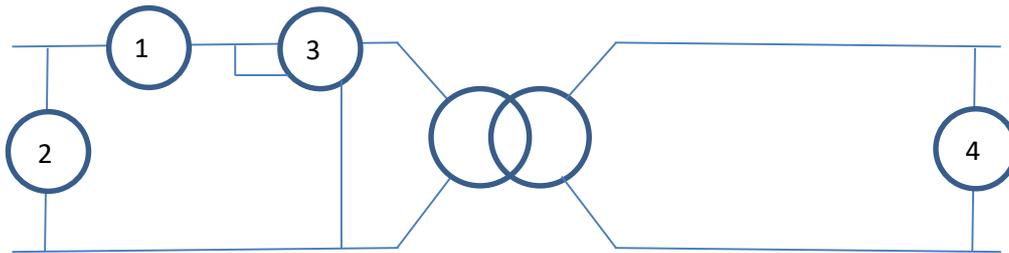
Exercice 3.

La plaque signalétique d'un transformateur monophasé porte les indications suivantes :

220 V / 24 V ; 50 Hz ; 200 VA

- 1- Donner la signification des trois valeurs relevées sur la plaque signalétique.
- 2- Calculer la valeur efficace I_{2N} de l'intensité nominale du courant au secondaire.
- 3- On effectue un essai à vide sous la tension primaire 220 V. On mesure une puissance active fournie au primaire $P_{10} = 6 \text{ W}$; l'intensité du courant au primaire est $I_{10} = 0,11 \text{ A}$; la tension au secondaire est $U_{20} = 24 \text{ V}$.

- a- Donner le nom de chacun des appareils de mesure 1, 2, 3, et 4 de la figure et indiquer la valeur numérique lue sur chacun d'eux.



- b- Quelles pertes l'essai à vide permet-il de mesurer ?
- c- Calculer le rapport de transformation.

4.4.2 Corrigés

Exercice 1

- 1- la valeur efficace de la tension secondaire U_{20} pour $U_1 = 220 \text{ V}$.

On a $m = U_{20}/U_1 = N_2/N_1 = 0.127 \rightarrow U_{20} = m U_1$

$$\text{An : } U_{20} = 0.127 * 220 = 27.94 \text{ V}$$

- 2- Le nombre de spire au primaire N_1

On a $N_2 = 30$ spires et $m = 0.127 \rightarrow N_1 = N_2 / m$

$$\text{An : } N_1 = 30 / 0.127 = 111.111 \text{ V}$$

- 3- Le courant efficace au secondaire pour un courant primaire $I_1 = 0,5 \text{ A}$.

Le transformateur étant idéal, alors $m = I_1/I_2 \rightarrow I_2 = I_1 / m$

$$\text{An : } I_2 = 0.5 / 0.127 = 3.94 \text{ A}$$

Exercice 2.

Données : Transformateur parfait avec $U_1 = 230 \text{ V}$, $U_{20} = 24 \text{ V}$, $N_1 = 1030$ spires

Le secondaire débite 2,5 A dans une charge inductive de facteur de puissance égal à 0,8.

- 1-

- le rapport de transformation $m = N_2/N_1 = U_{20}/U_1$

$$\text{An : } m = 24 / 220 = 0.109$$

- le nombre de spires au secondaire $N_2 = N_1 m$

$$\text{An : } N_2 = 1030 * 0.109 = 112.27 \text{ soit } N_2 = 112 \text{ spires}$$

Le nombre de spire est un nombre entier

- 2- Le transformateur étant parfait, alors : $m = I_1/I_2$ et le déphasage $\varphi_2 = \varphi_1$

- L'intensité du courant efficace $I_1 : I_1 = m I_2$
AN : $I_1 = 0.109 * 2.5 = 0.273 \text{ A}$
- La puissance active $P_1 = U_1 I_1 \cos(\varphi_1)$
AN : $P_1 = 220 * 0.273 * 0.8 = 48 \text{ W}$
- La puissance apparente $S_1 = U_1 I_1 = \sqrt{(P_1^2 + Q_1^2)}$
AN : $I_1 = 220 * 0.273 = 60 \text{ VA}$
- La puissance réactive $Q_1 = U_1 I_1 \sin(\varphi_1) = \sqrt{(S_1^2 - P_1^2)} = \sqrt{(60^2 - 48^2)} = 36 \text{ VAR}$

Exercice 3.

Plaque signalétique du transformateur : 220 V / 24 V ; 50 Hz ; 200 VA

1- Signification des indications sur la plaque signalétique.

- 220 V : U_{1N} tension nominale de l'enroulement primaire "enroulement HT bien que ce soit une basse tension"
- 24 V : U_{2N} tension nominale de l'enroulement secondaire "enroulement BT"
- 50 Hz : fréquence
- 200 VA : puissance apparente nominale du transformateur $S_N = U_{1N} I_{1N} = I_{2N} U_{2N}$

Remarque : le transformateur est réversible

2- Intensité efficace du courant au secondaire I_{2N}

On a $S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N} \rightarrow I_{2N} : I_{2N} = S_N / U_{2N}$

$$\text{AN : } I_{2N} = 200 / 24 = 8.34 \text{ A}$$

3- A vide sous la tension primaire $U_{1N} = 220 \text{ V}$. On mesure $P_{10} = 6 \text{ W}$; $I_{10} = 0,11 \text{ A}$; $U_{20} = 24 \text{ V}$.

a- Nom de chacun des appareils de mesure de la figure et valeur numérique lue sur chacun d'eux.

1 : Ampèremètre il indique 0.11 A

2 : Voltmètre il indique 220 V

3 : Wattmètre il indique 6 W

4 : Voltmètre 24 V

b- L'essai à vide permet de mesurer les pertes à vides du transformateur

c- Le rapport de transformation : $m = U_{20}/U_1$

$$\text{AN : } m = 24 / 220 = 0.109$$

Vidéos learning

Principe de fonctionnement d'un transformateur

V1



Lien hypertexte



5. Transformateur réel

Le modèle de transformateur idéal néglige les aspects linéaires fondamentaux des transformateurs réels suivants :

- Pertes du circuit magnétique (noyau), appelées collectivement pertes de courant magnétisant, constituées de
 - pertes d'hystérésis dues aux effets magnétiques non linéaires dans le noyau du transformateur, et
 - pertes par courant de Foucault dues à l'échauffement joule dans le noyau qui sont proportionnelles au carré de la tension appliquée au transformateur.
- Contrairement au modèle idéal, les enroulements d'un transformateur réel ont des résistances et des inductances non nulles associées aux :
 - pertes Joule dues à la résistance dans les enroulements primaire et secondaire
 - flux de fuite qui s'échappe du noyau et ne traverse qu'un seul enroulement, ce qui se traduit par une inductance de fuite en série avec chaque enroulement du transformateur (fig. 1.19).

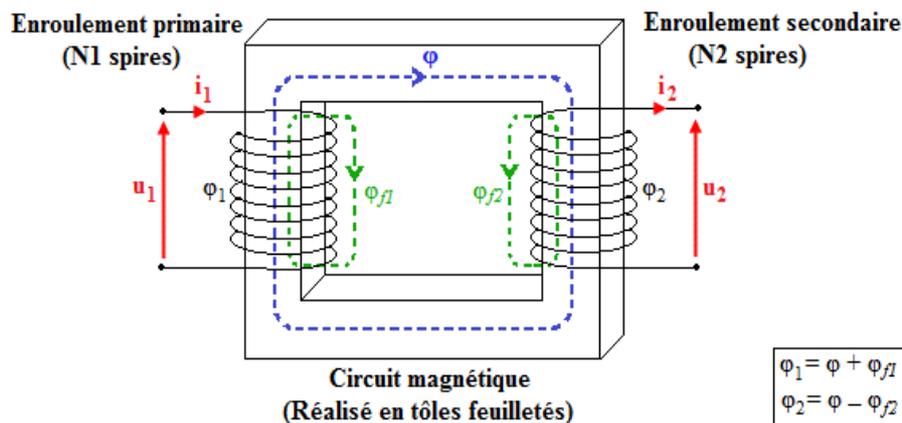


Figure 1.19. Transformateur réel

5.1 Modèle du transformateur réel

Le modèle d'un transformateur est un circuit équivalent simplifié dans lequel les paramètres du transformateur peuvent être calculés plus facilement. Ce circuit équivalent permet l'étude du transformateur théoriquement.

5.1.1 Equations aux flux

Soit :

$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{f1}$: Le flux à travers l'enroulement primaire

$\Phi_2 = \Phi - \Phi_{f2}$: Le flux à travers l'enroulement secondaire

Les flux de fuites φ_{f1} et φ_{f2} se ferment dans l'aire, alors on peut représenter leur effet par des inductances telle que : $l * i = N * \varphi$

On aura :

$$l_1 = \frac{\varphi_{f1} * N_1}{i_1} : \text{Inductance de fuites au primaire}$$

$$l_2 = \frac{\varphi_{f2} * N_2}{i_2} : \text{Inductance de fuites au secondaire}$$

Les fuites étant modélisées, les f.é.m. e_1 et e_2 sont créées par le même flux φ commun aux deux bobines idéales ; nous avons donc : $e_1 = -N_1.d\varphi/dt$ et $e_2 = -N_2.d\varphi/dt$

5.1.2 Equations aux ampères-tours

A vide, la force magnétomotrice (f.m.m) est égale à $N_1 i_{10}$, elle crée un flux φ dans le circuit magnétique.

En charge, la force magnétomotrice (f.m.m) est égale à $N_1 i_1 + N_2 i_2$, elle crée le même flux φ dans le circuit magnétique.

Par conséquent, on aura : $N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 i_{10}$

Alors : $i_1 = -m i_2 + i_{10}$

Nous utilisons les modèles définis lors de l'étude des circuits magnétiques. Il y a un seul circuit magnétique pour deux bobines donc son modèle n'apparaîtra qu'une fois dans le modèle du transformateur. L'énergie magnétisante devant être fournie même à vide, le circuit magnétique sera modélisé au primaire par un dipôle constitué d'une résistance R_m en parallèle avec une réactance X_m . Elles représentent respectivement les pertes fers et la puissance réactive à vide Q_{10} .

5.1.3 Equations aux tensions

Le primaire se comporte comme un récepteur vis-à-vis à la source. En tenant comptes de résistance de l'enroulement primaire R_1 et du flux de fuite φ_{f1} , représenté électriquement par l'inductance de fuite l_1 , la loi d'Ohm au primaire donne :

$$u_1 = N_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + R_1 i_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} + N_1 \frac{d\varphi_{f1}}{dt} + R_1 i_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} + l_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1$$

En notation complexe

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + j l_1 \omega \underline{I}_1 + R_1 \underline{I}_1$$

Le secondaire se comporte comme un générateur vis-à-vis au récepteur. En tenant comptes de résistance de l'enroulement primaire R_2 et du flux de fuite φ_{f2} , représenté électriquement par l'inductance de fuite l_2 , loi d'Ohm au primaire donne :

$$u_2 = -N_2 \frac{d\varphi_2}{dt} - R_2 i_2 = -N_2 \frac{d\varphi}{dt} - N_2 \frac{d\varphi_{f2}}{dt} - R_2 i_2 = -N_1 \frac{d\varphi}{dt} - l_2 \frac{di_2}{dt} - R_2 i_2$$

En notation complexe

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - j l_2 \omega I_2 - R_2 I_2 \quad \text{ou bien} \quad \underline{E}_2 = \underline{U}_2 + j l_2 \omega I_2 + R_2 I_2$$

On pose :

$X_1 = l_1 \omega$: Réactance de fuites au primaire.

$X_2 = l_2 \omega$: Réactance de fuites au secondaire

L'équation du circuit primaire s'écrit : $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + j X_1 I_1 + R_1 I_1$

L'équation du circuit secondaire s'écrit : $\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + j X_2 I_2 + R_2 I_2$

5.1.4 Schéma équivalent

Le schéma équivalent du transformateur réel est représenté par la figure 1.20.

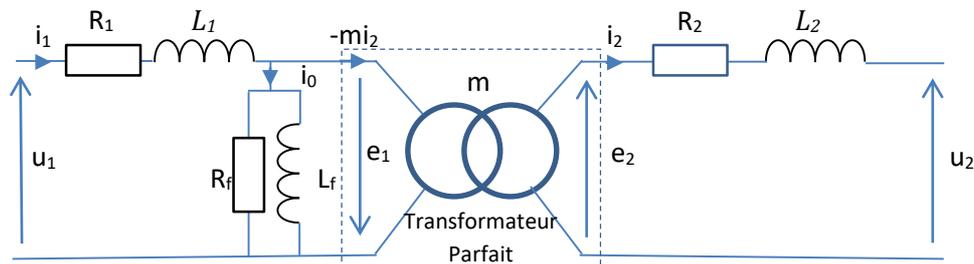


Figure 1.20. Schéma équivalent d'un transformateur réel

Avec

U_1 : tension au primaire, parfois aussi noté U_p ;

U_2 : tension au secondaire, parfois aussi noté U_s ;

L_1 : inductance de fuite au primaire, $X_1 = l_1 \omega$;

L_2 : inductance de fuite au secondaire, $X_2 = l_2 \omega$;

R_1 : résistance des bobinages au primaire, parfois aussi notée R_p ;

R_2 : résistance des bobinages au secondaire, parfois aussi notée R_s ;

L_f : inductance de magnétisation ou magnétisante, $X_f = L_f \omega$

R_f : résistance modélisant les pertes fer.

5.2 Modèle simplifié du transformateur dans l'approximation de Kapp "modèle de Kapp"

5.2.1 Simplification

L'hypothèse de Kapp consiste à négliger le courant i_{10} devant le courant i_1 sauf pour les faibles charges.

Donc $N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0$ alors : $i_1 = -m i_2$

Ne pas tenir compte de i_{10} revient, dans le modèle complet, à débrancher l'impédance magnétisante $R_f // X_f$, donc le schéma devient (fig. 1.21):

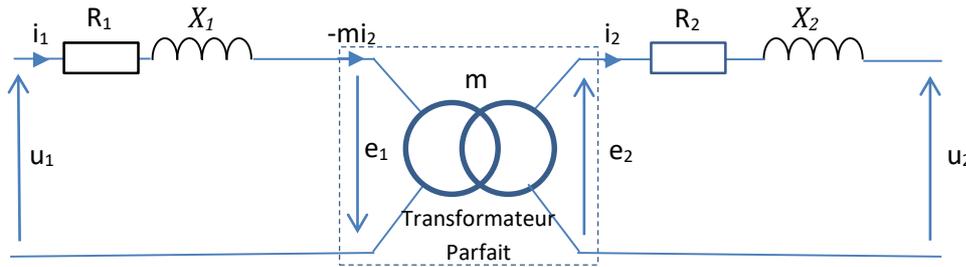


Figure 1.21. Schéma équivalent dans l'hypothèse de Kapp

5.2.2 Modèle de Kapp ramené au secondaire

On peut ramener les éléments R_1 et $X_1=L_1\omega$, situés initialement au primaire, vers le secondaire en les multipliant par m^2 . Le modèle équivalent obtenu, dit de **Kapp**, est représenté par le schéma de la figure 1.22.

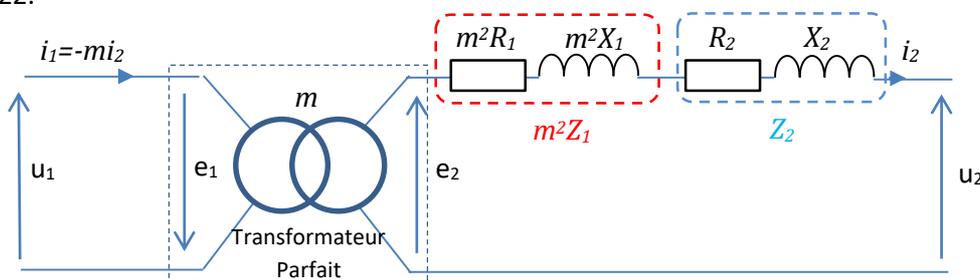


Figure 1.22. Schéma équivalent simplifié ramené au secondaire

Nous associons l'impédance secondaire

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j l_2 \omega$$

avec l'impédance ramenée du primaire

$$m^2 \underline{Z}_1 = m^2 (R_1 + j l_1 \omega)$$

pour obtenir l'impédance totale ramenée au secondaire

$$\underline{Z}_s = m^2 \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = m^2 (R_1 + j X_1) + R_2 + j X_2 = m^2 R_1 + R_2 + j (m^2 X_1 + X_2) = R_s + j X_s$$

avec

$$R_s = m^2 R_1 + R_2 \quad \text{et} \quad X_s = m^2 X_1 + X_2$$

R_s et L_s sont respectivement la résistance totale et la réactance de fuites totale ramenées au secondaire.

Le schéma équivalent dans l'hypothèse de Kapp ramené au secondaire est donné par la figure 1.23.

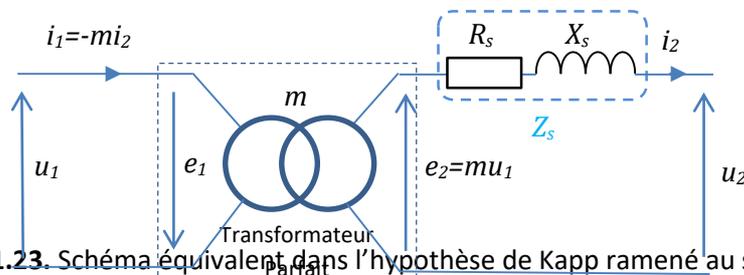


Figure 1.23. Schéma équivalent dans l'hypothèse de Kapp ramené au secondaire

Vue du primaire le transformateur réel dans l'approximation de Kapp est équivalent à un transformateur parfait, il n'y a plus d'impédance. La tension u_1 est appliquée directement sur l'enroulement du primaire

$$u_1 = -e_1 \quad \text{et} \quad i_1 = -m i_2.$$

Vue du secondaire le transformateur réel dans l'approximation de Kapp est l'équivalent d'un générateur de Thevenin telle que :

- La f.é.m. : $u_{20} = e_2 = -m u_1$ en module $U_{20} = m U_1$
- L'impédance : $Z_s = R_s + jX_s$ en module $Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$
- L'équation : $\underline{E}_2 = -m \underline{U}_1 = \underline{U}_{20} = \underline{U}_2 + jX_s \underline{I}_2 + R_s \underline{I}_2$

Le diagramme vectoriel, cas d'une charge inductive au secondaire, est donné par la figure 1.248.

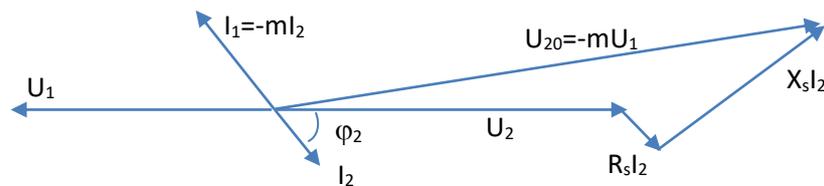


Figure 1.24. Diagramme vectorielle, cas d'une charge inductive

5.2.3 Modèle de Kapp corrigé

En pratique, la chute de tension primaire d'un transformateur réel causée par R_1 et X_1 est faible devant u_1 , il est inutile d'en tenir compte. On remarque que l'on peut toujours introduire les pertes fer par la présence du courant i_{10} courant absorbé à vide par le transformateur. On peut donc alimenter les pertes fer (R_f) et l'imperfection du circuit magnétique (X_f) par la tension u_1 . On obtient alors un schéma équivalent corrigé et suffisamment précis (fig. 1.25).

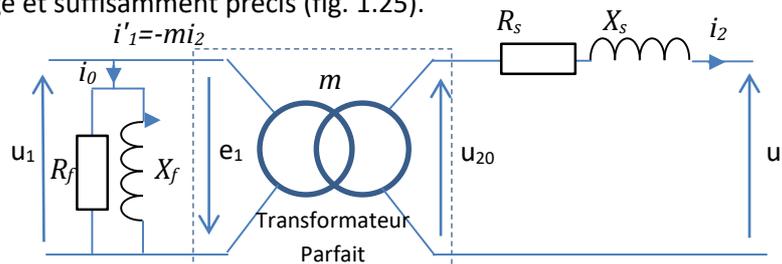


Figure 1.25. Schéma équivalent dans l'hypothèse de Kapp corrigé

Remarque : On peut envisager un modèle ramener au primaire où $R_p = R_s/m^2$ et $X_p = X_s/m^2$

5.3 Bilan de puissance

On applique le théorème de Boucherot : Puissance absorbée = puissance fournie + pertes

Les pertes d'un transformateur sont situées :

- Dans le circuit magnétique : Les pertes fer (P_{fer}).
 - Pertes par hystérésis
 - Pertes par courant de foucaults
- Dans le cuivre utilisé pour réaliser les enroulements primaire et secondaire : Les pertes cuivre (P_{Cu}) que l'on appelle aussi Pertes joules (P_j).

Le diagramme de la figure 1.26 donne le bilan de puissance d'un transformateur.

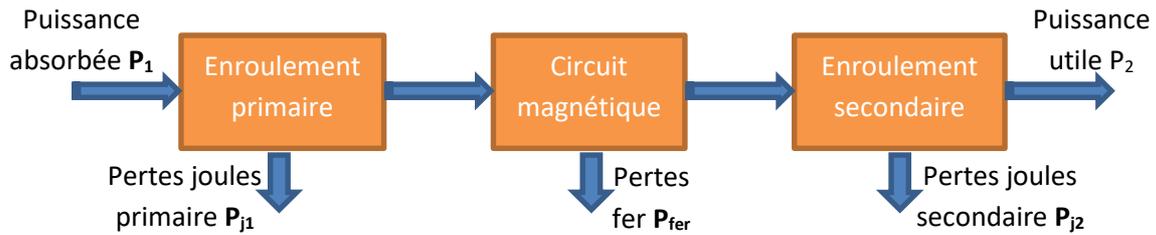


Figure 1.26. Bilan de puissance

On peut identifier sur le schéma équivalent les pertes du transformateur. Les résistances du modèle représentent les différentes puissances actives (fig. 27).

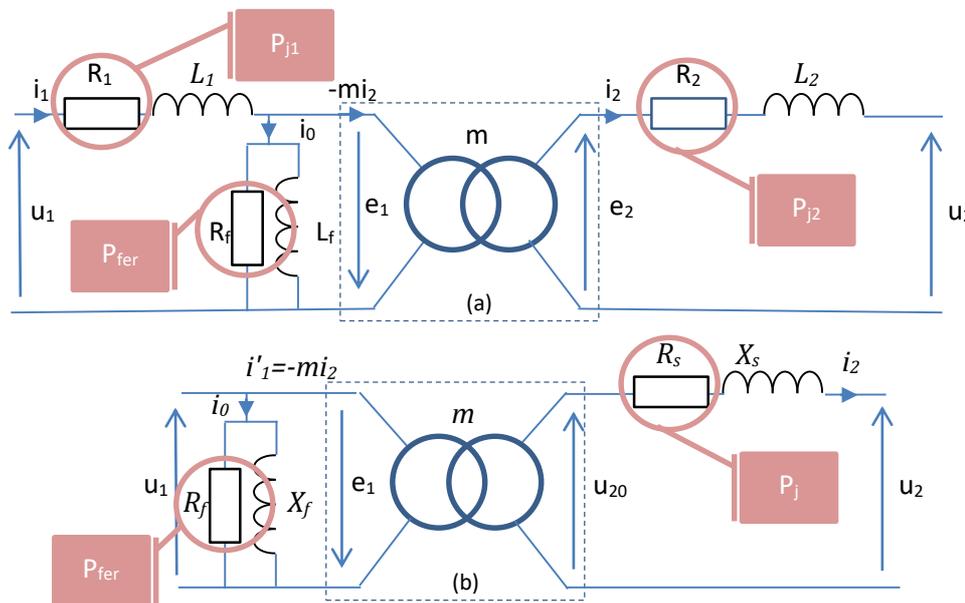


Figure 1.27. Identification des pertes : (a) transformateur réel ; (b) modèle de Kapp

5.3.1 Pertes par effet Joule ou pertes dans le cuivre

Le transformateur sera le siège de pertes par effet Joule (appelées également pertes cuivre). Elles sont dues aux résistances R_1 et R_2 des enroulements.

$$P_{j1} = R_1 I_1^2 \quad \text{et} \quad P_{j2} = R_2 I_2^2$$

$$P_j = P_{j1} + P_{j2} = R_s I_2^2$$

5.3.2 Pertes magnétiques ou pertes dans le fer

Le circuit magnétique du transformateur n'est pas parfait : il présente des phénomènes de saturation, d'hystérésis et de courant de Foucault. Ces pertes sont appelées pertes fer :

$$P_{\text{fer}} = P_{\text{foucault}} + P_{\text{Hyst}}$$

- Pertes par courant de Foucaults

Le champ magnétique variable au cours du temps est responsable de l'apparition d'une force électromotrice à l'intérieur du milieu conducteur. Cette force électromotrice induit des courants dans la masse. Ces courants provoquent un échauffement par effet Joule de la masse conductrice d'autant plus fort que la fréquence est plus importante. La différence principale entre courant de Foucault et courant induit est les courants induits circulant dans les enroulements tandis que Les courants de Foucault circulant à l'intérieur du circuit magnétique en raison de l'induction électromagnétique.

Les courants de Foucault sont responsables d'une partie des pertes (dites pertes par courants de Foucault) dans les circuits magnétiques des transformateurs. C'est la raison pour laquelle les circuits magnétiques sont constitués de tôles feuilletées (fig1.28) afin de limiter ces courants et les pertes par effet Joule qui en découlent, ce qui améliore le rendement global des transformateurs.

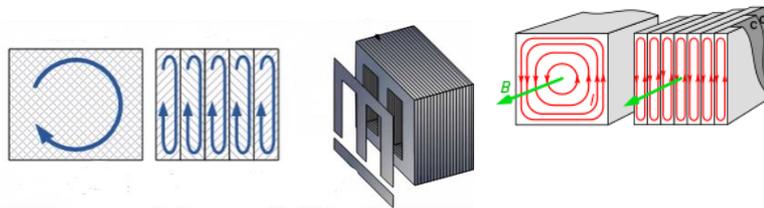


Figure 1.28. Feuilletage du circuit magnétique.

On montre que ces pertes sont proportionnelles au carré de la fréquence f , elles dépendent aussi du volume V du circuit magnétique, soit : $P_{\text{foucault}} = K.f^2$

- Pertes par hystérésis

L'hystérésis magnétique désigne un phénomène d'hystérésis observé lors de l'aimantation d'un matériau. Ainsi, lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué à un matériau ferromagnétique tel le fer, la présence de ce cycle d'hystérésis traduit le fait que le chemin suivi par l'aimantation d'un matériau ferromagnétique n'est pas le même selon le cas où le champ décroît ou croît (fig. 1.29).

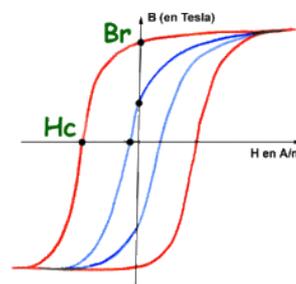


Figure 1.29. Hystérésis

Pour réduire les pertes par hystérésis on utilise un matériau à cycles étroits, comme le fer au silicium. Ces pertes sont proportionnelles à la fréquence

Sous une même tension primaire, les pertes magnétiques sont les mêmes à vide et en charge Pour les réduire, il faut :

- adopter une valeur de B_m limitée (entre 1,4 et 1,6 T) ;
- utiliser des tôles ferromagnétiques de bonne qualité (à cristaux orientés ; 0,6 W/kg).

5.3.3 Rendement

Le rendement est le rapport :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P_{ertes}}$$

Le rendement est déterminé soit :

- par la méthode des pertes séparées, pour les grandes puissances : essai à vide et en court-circuit.
- par la méthode directe par un essai en charge à l'aide des deux wattmètres pour les faibles puissances.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{fer} + P_j}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + R_s I_2^2 + P_{fer}} = \frac{U_2 \cos \varphi_2}{U_2 \cos \varphi_2 + R_s I_2 + \frac{P_{fer}}{I_2}}$$

Cette fonction admet un maximum lorsque $P_{fer} = P_j = R_s I_2^2$

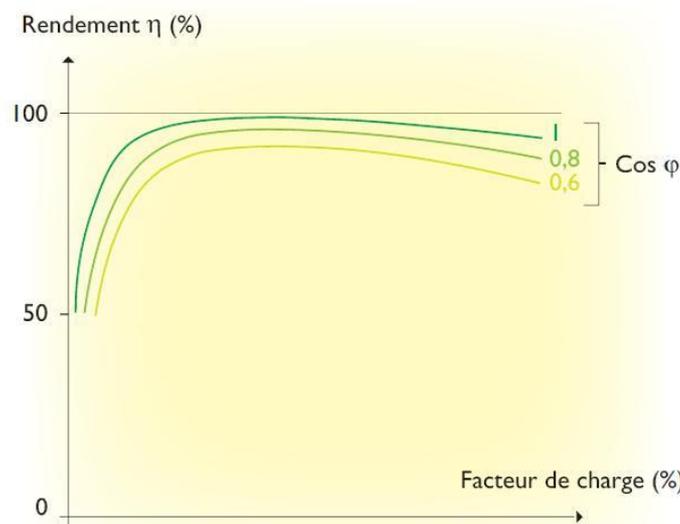


Figure 1.29. Allure du rendement pour différents facteurs de charge et différents $\cos(\phi)$

Remarque : Si le régime de fonctionnement du transformateur est rarement chargé on privilégiera un transformateur avec de faibles pertes fer (faible volume de fer et de champ max) et des pertes Joules plus importantes de façon à améliorer le rendement journalier.

5.4 Détermination expérimentale des éléments du modèle de Kapp

On considère le modèle de la figure 1.25.

L'utilisation du modèle nécessite la connaissance des valeurs de m , R_f , X_f , R_s et X_s ; ces éléments sont déterminés à partir de deux essais.

5.4.1 Essai à vide

Lors de l'essai à vide, le courant de sortie I_2 est nul.

Le transformateur est alimenté généralement sous la tension efficace nominale primaire U_{1N} . On mesure (fig. 1.26) :

- La tension primaire U_{1N} ;
- le courant efficace à vide I_{10} ;
- la puissance primaire P_{10} ;
- la tension efficace secondaire U_{20} .

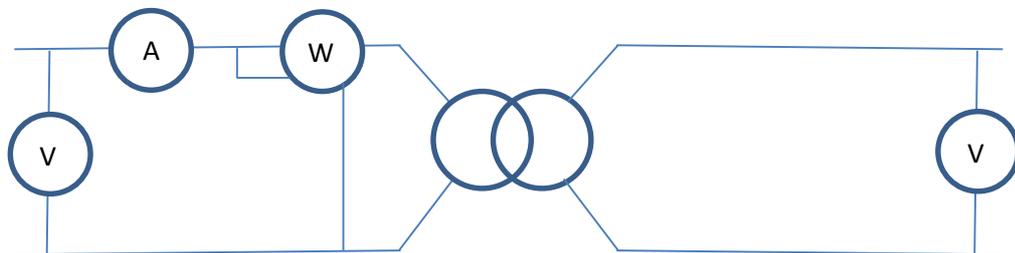


Figure 1.26. Essai à vide

Les paramètres (m , R_f et X_f) peuvent être déterminés comme suit :

- Rapport de transformation m :

Le courant secondaire étant nul, $U_{20} = m \cdot U_{1N}$, d'où le rapport de transformation

$$m = U_{20} / U_{1N} = N_2 / N_1$$

- Résistance R_f :

La puissance secondaire est nulle ($P_{20} = 0$) et les pertes par effet Joule se réduisant à

$$P_{j0} = R_1 \cdot I_{10}^2$$

la puissance $P_{10} = P_{j0} + P_{fer}$ est peu différente des pertes dans le fer ($P_{j0} \ll P_{fer}$).

D'où la résistance

$$R_f = U_{1N}^2 / P_{10}$$

- Réactance magnétisante X_f :

Les pertes dans le fer sont proportionnelles au carré de la tension donc R_f est indépendante de la tension d'essai.

La puissance réactive primaire peut être calculée ; le facteur de puissance à vide est :

$$\cos \varphi_{10} = P_{10} / (U_{10} \cdot I_{10})$$

$$\text{d'où } Q_{10} = P_{10} \cdot \text{tg } \varphi_{10}.$$

Cette puissance représente les pertes réactives Q_{fer} dans le fer car la puissance réactive de fuites primaire est négligeable. Nous en déduisons

$$X_f = U_{10}^2 / Q_{10}.$$

En raison de la saturation du circuit magnétique cette réactance dépend du flux donc de la tension d'essai U_{10} . Nous la considérerons constante pour de petites variations de U_{10} autour de sa valeur nominale U_{1N} .

5.4.2 Essai en court-circuit

Le secondaire étant en court-circuit, nous alimentons le primaire par une tension réduite à travers un alternostat (autotransformateur) et nous réglons la tension primaire U_{1cc} pour obtenir un courant primaire de court-circuit I_{1cc} voisin du courant nominal I_{1N} (fig. 1.27).

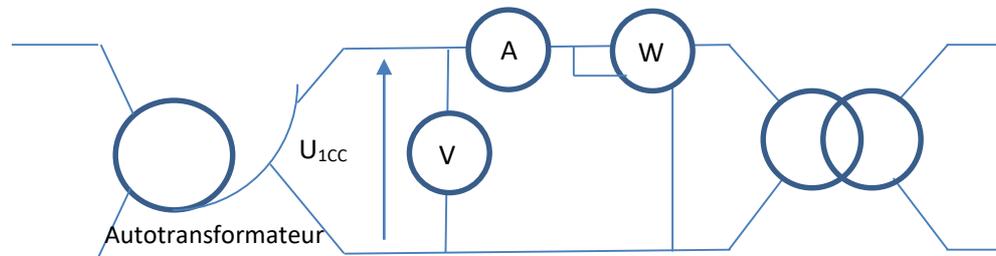


Figure 1.27. Essai en court-circuit

On mesure : I_{1cc} , U_{1cc} et P_{1cc} .

Le courant secondaire I_{2cc} peut être mesuré avec un ampèremètre mais il faut être sûr que l'impédance de l'appareil est négligeable devant l'impédance interne du transformateur.

Lors d'un essai en court-circuit (R_s et X_s) peuvent être déterminés comme suit :

- Résistance R_s :

La puissance secondaire étant nulle, au primaire $P_{1cc} = P_{\text{fer}_{cc}} + P_{jcc}$. Les pertes dans le fer étant proportionnelles au carré de la tension et U_{1cc} n'excédant pas 10% de la tension nominale, elles sont négligeables devant les pertes par effet Joule ; nous en déduisons

$$P_{1cc} = P_{jcc} = R_s I_{2cc}^2$$

La réduction de la tension rend négligeable le courant magnétisant, d'autant plus que le circuit magnétique étant peu saturé dans cet essai, la réactance magnétisante X_f est plus forte que sous tension nominale ; donc I_{2cc} est peu différent de I_{1cc} / m .

On obtient :

$$R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2} = m^2 \frac{P_{1cc}}{I_{1cc}^2}$$

U_{2cc} étant nulle, le module de l'impédance totale ramenée au secondaire est $Z_s = mU_{1cc} / I_{2cc}$

soit

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = m \frac{U_{1cc}}{I_{2cc}} = m^2 \frac{U_{1cc}}{I_{1cc}}$$

Nous connaissons Z_s et R_s donc la réactance de fuites

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}.$$

Pour calculer la réactance de fuites, nous pouvons aussi calculer la puissance réactive Q_{1cc} , les pertes fer réactives sous tension réduite étant négligeables, il vient

$$Q_{1cc} = X_s \cdot I_{2cc}^2 \rightarrow X_s = m^2 Q_{1cc} / I_{1cc}^2.$$

Généralement la tension La tension de court-circuit est exprimée en pourcentage de la tension nominale. C'est la tension à mettre au primaire pour que le transformateur en court-circuit au secondaire débite le courant nominal : $U_{cc}\% = 100 * U_{1cc} / U_1$

5.5 Fonctionnement en charge

Nous considérons le modèle de Kapp (fig.1.25). Nous avons donc :

- La f.é.m. : $u_{20} = e_2 = -mu_1$ en module $U_{20} = mU_1$
- L'équation : $\underline{E}_2 = -m \underline{U}_1 = \underline{U}_{20} = \underline{U}_2 + jX_s I_2 + R_s I_2$
- L'impédance : $Z_s = R_s + jX_s$ en module $Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$

La tension secondaire $\underline{U}_2 = \underline{U}_{20} - \underline{Z}_s \cdot \underline{I}_2$ dépend donc du courant de charge en module et phase.

A vide la tension secondaire efficace est $U_{20} = mU_1$; en charge la tension est différente de cette valeur $U_2 < U_{20}$. La chute de tension en charge est la différence des tensions efficaces secondaires à vide et en charge pour une même tension primaire :

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = m \cdot U_1 - U_2.$$

Nous ne pouvons pas appliquer directement l'équation de la maille au secondaire pour trouver une relation entre les modules U_2 et U_{20} , car nous ne connaissons pas la phase de U_{20} . Nous allons raisonner graphiquement.

5.5.1 Diagramme de Kapp

Connaissions les valeurs efficaces U_2 , I_2 et le déphasage φ_2 entre (I_2 , U_2) imposé par la charge.

Traçons le diagramme de Fresnel au secondaire du modèle de Kapp.

- Portons OA, la tension secondaire U_2 suivant l'origine des phases
- Représentant l'intensité secondaire I_2 en retard de phase par rapport à U_2 (Cas d'une charge inductive)
- À l'échelle des tensions, nous traçons OB, représentant $R_s \cdot I_2$ en phase avec I_2 (parallèle à I_2)

- Traçons BC, représentant $X_s \cdot I_2$, en quadrature avant sur le courant I_2 ,
- OC représente alors la tension U_{20} .

Nous en déduisons donc $U_1 = U_{20}/m$.

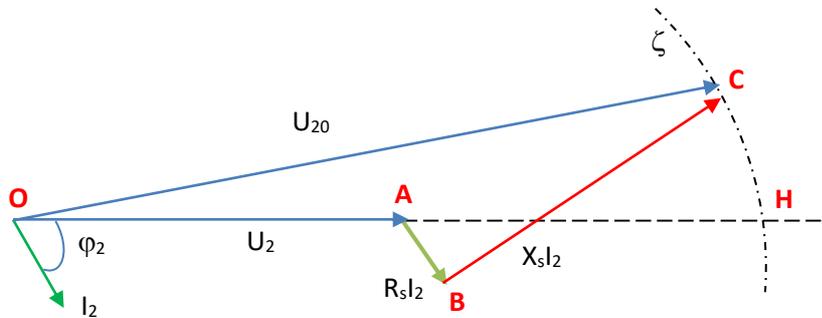


Figure 1.27. Diagramme de Kapp.

Le cercle ζ de centre O et de rayon OC coupe OA en H. La mesure algébrique de AH orientée dans le sens de OA représente la chute de tension ΔU_2 .

Dans le diagramme de la figure 1.25 le triangle ABC est appelé **triangle de Kapp** ; l'angle (AC,AB) est égal à l'argument de l'impédance \underline{Z}_s c'est à dire au déphasage primaire φ_{1cc} en court-circuit.

5.5.2 Chute de tension approchée

En réalité la chute de tension ΔU_2 est faible devant U_{20} et U_2 , les dimensions du triangle de Kapp sont petites devant celle de OC et OA (fig. 1.27). Pour des grandeurs voisines des valeurs nominales, elles représentent quelques % de U_2 .

Sur le diagramme de Kapp (fig.1.28), projetons orthogonalement le point C ($OC=U_{20}$) en K sur la droite OA. L'arc CH est de longueur faible devant le rayon du cercle. Les points H et K sont voisins et nous pouvons dire en première approximation que la chute de tension est représentée par la mesure algébrique AK. On néglige KH et $\Delta U_2 \approx AK$.

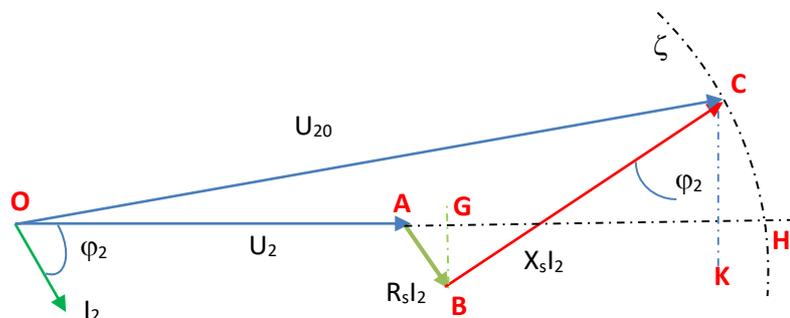


Figure 1.28. Chute de tension simplifiée.

Si nous voulons nous affranchir de l'imprécision graphique, nous pouvons déduire du graphe une formule donnant la chute de tension.

Le point G représente la projection de B sur la droite OA et $\Delta U_2 \approx AK = AG + GK$

Avec $AG = R_s I_2 \cos \varphi_2$ et $GK = X_s I_2 \sin \varphi_2$

D'où $\Delta U_2 \approx R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2$

Généralement la chute de tension est donnée par sa valeur relative

$$\Delta U_2 \% = 100 \frac{\Delta U_2}{U_{20}}$$

5.5.3 Prédétermination du fonctionnement en charge

Problème direct

Nous nous donnons les grandeurs secondaires U_2 , I_2 et φ_2 et nous voulons calculer la tension primaire U_1 .

En utilisant le diagramme de Kapp ou le calcul approché nous déterminons la chute de tension ΔU_2 puis la tension primaire

$$U_1 = (U_2 + \Delta U_2) / m.$$

Problème inverse

Nous nous donnons U_1 , I_2 et φ_2 et nous voulons calculer U_2 . Nous calculons la chute de tension approchée ou corrigée suivant la précision requise et nous en déduisons

$$U_2 = m \cdot U_1 - \Delta U_2.$$

Dans les deux cas, le bilan de puissance (paragraphe 5.3) permet de calculer les puissances active P_1 , réactive Q_1 au primaire. Nous en déduisons la puissance apparente $S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$, le courant primaire $I_1 = S_1 / U_1$ et le facteur de puissance primaire $\cos \varphi_1 = P_1 / S_1$.

5.5.4 Caractéristiques du transformateur

Parmi les paramètres de fonctionnement U_1 , I_1 , φ_1 , U_2 , I_2 , φ_2 , seulement trois sont indépendants.

Nous pouvons définir les caractéristiques du transformateur :

- Caractéristiques externes $U_2(I_2)$ à U_1 et φ_2 constants
- Caractéristiques de réglage $U_1(I_2)$ à U_2 et φ_2 constants.

Les tensions primaire et secondaire étant liées, étudions la chute de tension en fonction de I_2 et φ_2 en nous limitant au calcul approché.

Le triangle de Kapp est indépendant du déphasage, lorsque φ_2 varie il se modifie homothétiquement, l'angle $(AC, AB) = \arg \underline{Z}_s = \varphi_{cc}$ est le déphasage mesuré en court-circuit.

$$\varphi_{cc} = \arctan (X_s / R_s)$$

On peut donc écrire : $\Delta U_2 \approx Z_s I_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_{cc})$

Pour un courant donné, la chute de tension est fonction de φ_2 .

- $\Delta U_2 = 0$ pour $\varphi_2 = \varphi_{cc} - \pi/2$ (Charge à comportement capacitive).
- ΔU_2 est maximale pour $\varphi_2 = \varphi_{cc}$ (Charge à comportement inductive).

Nous traçons les diagrammes de Kapp pour diverses valeurs du déphasage φ_2 et du courants I_2 .

- Pour $\varphi_2 = 0$, charge résistive, la chute de tension est égale à $R_s \cdot I_2$; elle est donc positive et croissante en fonction du courant.
- Pour $\varphi_2 > 0$, charge inductive la chute de tension est positive, croissante avec I_2 . Elle croit d'abord avec φ_2 , est maximale pour $\varphi_2 = \varphi_{cc}$, puis pour $\varphi_{cc} < \varphi_2 < \pi/2$ est décroissante lorsque φ_2 croît.
- Pour $\varphi_2 < 0$, charge capacitive, la chute de tension d'abord est positive pour $\varphi_{cc} - \pi/2 < \varphi_2$, elle s'annule, quel que soit le courant I_2 pour $\varphi_2 = \varphi_{cc} - \pi/2$ puis devient négative c'est à dire que la tension en charge est plus grande qu'à vide .

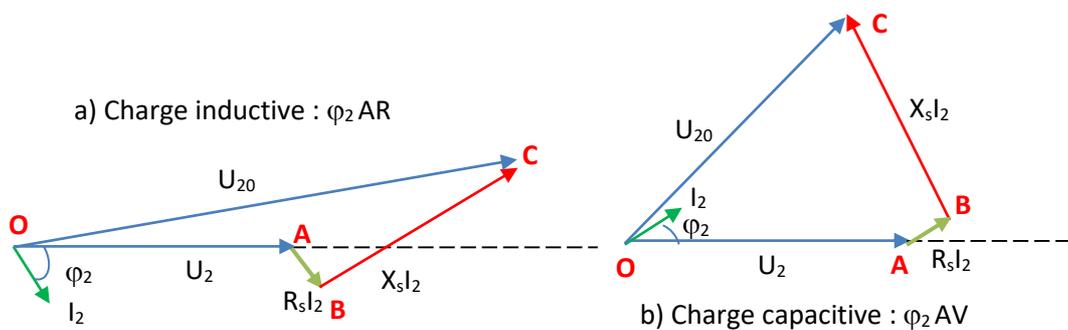


Figure 1.28. Chute de tension pour U_2 constante.

Connaissant la variation de la chute de tension, nous pouvons donner l'allure des caractéristiques externes du transformateur (fig.1.29).

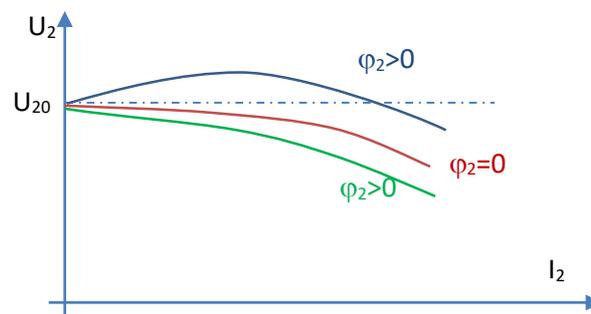


Figure 1.29. Allure de la tension U_2 aux bornes de la charge.

5.6 Plaque signalétique

La plaque signalétique d'un transformateur porte les indications nominales de celui-ci :

- puissance apparente 1 Kva
- fréquence 50 Hz
- tension primaire 230 v
- tension secondaire 115 v
- tension court-circuit en pourcent 2,6 %
- indice de protection IP21
- protection des personnes Classe 1
- isolation Classe B
- norme IEC 989

| Transformateur monophasé | | |
|--------------------------|-------------------------|----------|
| N°2536H | S= 1 KVA | IP21 |
| PRI. 230/400v | | 50/60 HZ |
| SEC. 115v | U _{cc} = 2,6 % | |
| Cl. 1 | Isol.Cl.B | IEC 989 |

5.7 Activités d'apprentissage

5.7.1 Enoncés

Exercice 1

Un transformateur 5000 V / 220 V a une puissance nominale S de 60 kVA. Un essai à vide sous tension primaire nominale a donné $P_{10} = 600$ W et un essai en court-circuit une puissance $P_{1cc} = 120$ W pour un courant au secondaire de 100 A. Calculer :

1. L'intensité nominale du courant dans le secondaire.
2. Les pertes dans le cuivre pour ce courant, pour un courant de 200 A, en admettant qu'elles sont proportionnelles au carré du courant.
3. Le rendement de ce transformateur pour ces trois courants avec un $\cos \phi_2 = 1$ puis égal à 0.8 si la tension au secondaire reste égale à 220 V.

Exercice 2

On veut déterminer le rendement d'un transformateur monophasé par la méthode des pertes séparées. Pour cela, trois essais sont réalisés :

Essai à vide : $U_{10} = 220$ V ; $U_{20} = 125$ V ; $I_{10} = 0.5$ A ; $P_{10} = 75$ W

Essai en court-circuit : $U_{1cc} = 20$ V ; $I_{2cc} = 10$ A ; $P_{1cc} = 110$ W

Essai sur charge résistive : $U_{1n} = 220$ V ; $U_2 = 120$ V ; $I_2 = 10$ A

1. Calculer le rapport de transformation.
2. Quel est le facteur de puissance à vide ?
3. Déterminer les pertes dans le fer et dans le cuivre au fonctionnement nominal.
4. Calculer le rendement du transformateur pour ce fonctionnement nominal.

Exercice 3

Les essais d'un transformateur monophasé ont donné les résultats suivants. On se place dans l'hypothèse de Kapp (c.à.d. d. que l'on néglige le courant magnétisant).

Essai à vide: $U_{10} = 10 \text{ kV}$ et $U_{20} = 230 \text{ V}$.

Essai en court-circuit : $U_{1cc} = 600 \text{ V}$, $I_{2cc} = 500 \text{ A}$, $P_{1cc} = 1750 \text{ W}$

1. Déterminer les valeurs des éléments du schéma équivalent du transformateur ainsi que le rapport de transformation.
2. Quelle est la valeur efficace de la tension secondaire lorsque ce secondaire débite un courant d'intensité $I_2 = 400 \text{ A}$ dans un circuit inductif dont le facteur de puissance est $\cos\varphi = 0,8$? On supposera que le primaire est alimenté sous une tension $U_1 = 10 \text{ kV}$.

Exercice 4

Un transformateur monophasé porte les indications suivantes sur sa plaque signalétique :

$S_n = 2200 \text{ VA}$, rendement 95 %, Primaire $V_{1n} = 220 \text{ V}$, Secondaire $V_{2n} = 127 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$

1. Calculer le courant primaire nominal : I_{1n}
2. Calculer le courant secondaire nominal : I_{2n}

Le rendement est précisé pour une charge absorbant le courant nominal sous tension secondaire nominale et présentant un facteur de puissance $\cos\varphi = 0,8$.

3. Calculer la valeur des pertes dans le transformateur dans ces conditions.
4. Représenter un schéma équivalent ramené au secondaire du transformateur en faisant apparaître les éléments classiques exposés dans le cours.
5. En supposant qu'au régime nominal les pertes sont uniformément réparties entre pertes fer et pertes Joules, calculer alors la valeur de tous les éléments résistifs du schéma.
6. La tension secondaire à vide de ce transformateur vaut $V_{20} = 133 \text{ V}$. Calculer alors le rapport de transformation : m . En utilisant la formule simplifiée donnant la chute de tension $\Delta V_2 = V_{20} - V_2$ au point nominal, calculer la valeur de l'inductance de fuite ramené au secondaire du transformateur.
7. En utilisant toujours la formule de la question 6, calculer la valeur de la tension secondaire correspondant à une charge absorbant la moitié du courant secondaire nominal, toujours avec un $\cos\varphi = 0,88$. Calculer alors le rendement du transformateur lorsqu'il débite sur une charge absorbant la moitié du courant nominal, toujours avec un $\cos\varphi = 0,8$

5.7.2 Corrigé

Exercice 1

Un transformateur 5000 V / 220 V a une puissance nominale S de 60 kVA. Un essai à vide sous tension primaire nominale a donné $P_{10} = 600 \text{ W}$ et un essai en court-circuit une puissance $P_{1cc} = 120 \text{ W}$ pour un courant au secondaire de 100 A. Calculer :

1. L'intensité nominale du courant dans le secondaire : $I_{2n} = S_n / 220$
 $I_{2n} = 60000 / 220 = 272.73 \text{ A}$
2. Les pertes dans le cuivre pour ce courant, pour un courant de 200 A, en admettant qu'elles sont proportionnelles au carré du courant.
 On a : $P_j = R_s I_2^2 \rightarrow R_s = P_j / I_2^2$

Pour $I_2 = 100\text{A}$ les $P_j = 120\text{ W}$. En court-circuit $P_{cc} = P_j$ alors $R_s = 120 / 100^2 = 0.012\ \Omega$

Pour $I_2 = 200\text{ A}$ les $P_j = 480\text{ W}$

Et pour $I_{2n} = 272.73\text{ A}$ les $P_j = 892,58\text{ W}$

3. Le rendement de ce transformateur pour ces trois courants avec un $\cos \varphi_2 = 1$ puis égal à 0.8 si la tension au secondaire reste égale à 220 V.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_{22} + R_s I_2^2 + P_{fer}}$$

On considère $P_{fer} = P_{10} = 600\text{ W}$

| Courant I_2 | P_j | P_2 | | η | |
|-----------------|--------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| | | $\cos \varphi_2=1$ | $\cos \varphi_2=0.8$ | $\cos \varphi_2=1$ | $\cos \varphi_2=0.8$ |
| 100 A | 120 W | 22 kW | 17.66 kW | 96.83 % | 96.08 % |
| 200A | 480 W | 44 kW | 35.2 kW | 97.6 % | 97.2 % |
| 272.73 A | 892.58 | 66 kW | 52.8 kW | 97.79 % | 97.25 |

Exercice 2

On veut déterminer le rendement d'un transformateur monophasé par la méthode des pertes séparées. Pour cela, trois essais sont réalisés :

Essai à vide : $U_{10} = 220\text{ V}$; $U_{20} = 125\text{ V}$; $I_{10} = 0.5\text{ A}$; $P_{10} = 75\text{ W}$

Essai en court-circuit : $U_{1cc} = 20\text{ V}$; $I_{2cc} = 10\text{ A}$; $P_{1cc} = 110\text{ W}$

Essai sur charge résistive : $U_{1n} = 220\text{ V}$; $U_2 = 120\text{ V}$; $I_2 = 10\text{ A}$

1. Calculer le rapport de transformation.

$$m = U_{20} / U_{10}; \text{ An : } m = 125 / 220 = 0.568$$

2. Quel est le facteur de puissance à vide ?

$$\text{A vide : } P_{10} = U_{10} I_{10} \cos \varphi_{10} \rightarrow \cos \varphi_{10} = P_{10} / (U_{10} I_{10})$$

$$\text{An : } \cos \varphi_{10} = 75 / (220 * 0.5) = 0,67$$

3. Déterminer les pertes dans le fer et dans le cuivre au fonctionnement nominal.

$$P_{fer} = \text{constante} = P_{10} = 75\text{ W}$$

$$P_j = R_s I_2^2 \text{ au fonctionnement nominal } P_j = P_{1cc} = 110\text{ W}$$

4. Calculer le rendement du transformateur pour ce fonctionnement nominal.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_{22} + R_s I_2^2 + P_{fer}}$$

An :

$$\eta = \frac{110 * 10}{110 * 10 + 110 + 75} = 0.856$$

Exercice 3

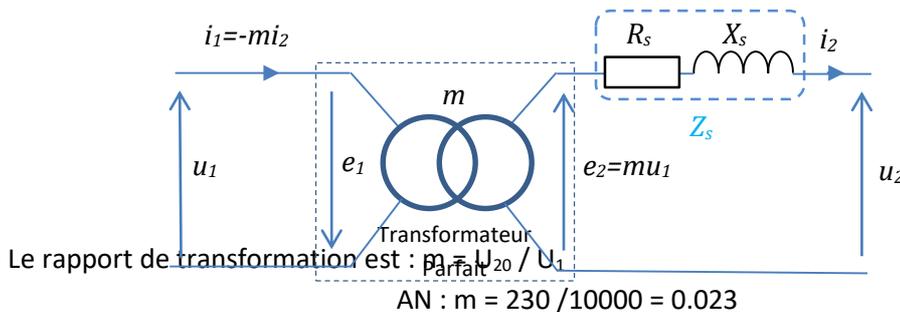
Les essais d'un transformateur monophasé ont donné les résultats suivants. On se place dans l'hypothèse de Kapp (c.à.d. d. que l'on néglige le courant magnétisant).

Essai à vide : $U_{10} = 10 \text{ kV}$ et $U_{20} = 230 \text{ V}$.

Essai en court-circuit : $U_{1cc} = 600 \text{ V}$, $I_{2cc} = 500 \text{ A}$, $P_{1cc} = 1750 \text{ W}$

- Déterminer les valeurs des éléments du schéma équivalent du transformateur ainsi que le rapport de transformation.

Le schéma équivalent dans l'hypothèse de Kapp ramené au secondaire en négligeant le courant magnétisant est donné par la figure suivante



Lors de l'essai en court-circuit $P_{1cc} = P_j = R_s I_2^2 \rightarrow R_s = P_j / I_2^2$

$$\text{AN : } R_s = 1750 / 500^2 = 7.10^{-3} \Omega$$

En court-circuit : $m \cdot U_{1cc} = Z_s \cdot I_{2cc} \rightarrow Z_s = m \cdot U_{1cc} / I_{2cc} = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$

Soit $X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{((m \cdot U_{1cc}) / I_{2cc})^2 - R_s^2}$

$$\text{AN : } \sqrt{((0.023 \cdot 600) / 500)^2 - 0.007^2} = 0.027 \Omega$$

- Quelle est la valeur efficace de la tension secondaire lorsque ce secondaire débite un courant d'intensité $I_2 = 400 \text{ A}$ dans un circuit inductif dont le facteur de puissance est $\cos \varphi = 0,8$? On supposera que le primaire est alimenté sous une tension $U_1 = 10 \text{ kV}$.

On calcule la chute de tension ΔU_2 puis la tension U_2 : $U_2 = U_{20} - \Delta U_2$.

$$\Delta U_2 \approx R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2 = R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}$$

$$U_2 = U_{20} - R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}$$

$$\text{AN : } U_2 = 230 - (0.007 \cdot 500 \cdot 0.8 + 0.27 \cdot 500 \cdot \sqrt{1 - 0.8^2}) = 219 \text{ V}$$

Exercice 4

Un transformateur monophasé porte les indications suivantes sur sa plaque signalétique :

$S_n = 2200 \text{ VA}$, rendement 95 %, Primaire $V_{1n} = 220 \text{ V}$, Secondaire $V_{2n} = 127 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$

- Calculer le courant primaire nominal : I_{1n}
 $S_n = V_{1n} I_{1n} = V_{2n} I_{2n} \rightarrow I_{1n} = S_n / V_{1n}$; AN : $2200 / 220 = 10 \text{ A}$
- Calculer le courant secondaire nominal : I_{2n}
 $I_{2n} = S_n / V_{2n}$; AN : $2200 / 127 = 17.3 \text{ A}$

Le rendement est précisé pour une charge absorbant le courant nominal sous tension nominale et présentant un facteur de puissance $\cos \varphi = 0,8$.

- Calculer la valeur des pertes dans le transformateur dans ces conditions.

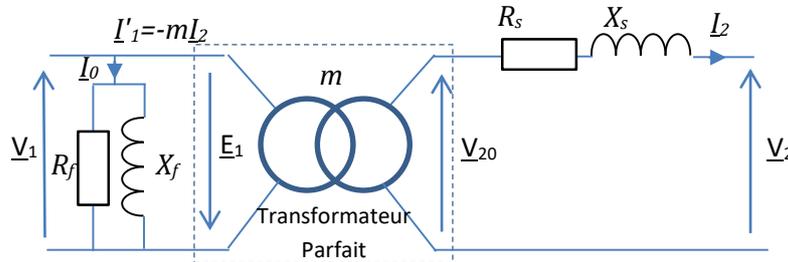
$$P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2 \text{ et } P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1 = P_2 + \sum \text{pertes}$$

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \sum \text{pertes}) \rightarrow \sum \text{pertes} = P_2 / \eta - P_2$$

$$\text{An : } P_2 = V_2 I_2 \cos\varphi_2 = 127 * 17.3 * 0.8 = 1760 \text{ W}$$

$$\sum \text{pertes} = P_2 / \eta - P_2 = 1760 / 0.95 - 1760 = 92.6 \text{ W}$$

4. Représenter un schéma équivalent ramené au secondaire du transformateur en faisant apparaître les éléments classiques exposés dans le cours.



5. En supposant qu'au régime nominal les pertes sont uniformément réparties entre pertes fer et pertes Joules, calculer alors la valeur de tous les éléments résistifs du schéma.

- $P_j = R_s I_{2n}^2 = P_{fer} = V_{1n}^2 / R_f = \sum \text{pertes} / 2$
 An : $P_j = P_{fer} = \sum \text{pertes} / 2 = 92.6 / 2 = 46.3 \text{ W}$

- $P_j = R_s I_{2n}^2 \rightarrow R_s = P_j / I_{2n}^2$
 An : $R_s = 46.3 / 17.3^2 = 0.15 \Omega$

- $P_{fer} = V_{1n}^2 / R_f \rightarrow R_f = V_{1n}^2 / P_{fer}$
 An : $R_f = V_{1n}^2 / P_{fer} = 220^2 / 46.3 = 1045 \Omega$

6. La tension secondaire à vide de ce transformateur vaut $V_{20} = 133 \text{ V}$. Calculer alors le rapport de transformation : m . En utilisant la formule simplifiée donnant la chute de tension $\Delta V_2 = V_{20} - V_2$ au point nominal, calculer la valeur de l'inductance de fuite ramenée au secondaire du transformateur.

- $m = V_{20} / V_{10} = 133 / 220 = 0.604$

- $\Delta V_2 = V_{20} - V_2 \approx R_s I_2 \cos\varphi_2 + X_s I_2 \sin\varphi_2 \rightarrow X_s = (\Delta V_2 - R_s I_2 \cos\varphi_2) / I_2 \sin\varphi_2$
 $X_s = L_s \omega$

$$\text{An : } X_s = (133 - 127 - 0.15 * 17.3 * 0.8) / (17.3 * \sin(\arccos 0.8)) = 0.378 \Omega$$

$$L_s = X_s / 2\pi f = 0.378 / 2 * \pi * 50 = 1.2 \text{ mH}$$

7. En utilisant toujours la formule de la question 6, calculer la valeur de la tension secondaire correspondant à une charge absorbant la moitié du courant secondaire nominal, toujours avec un $\cos\varphi = 0,8$. Calculer alors le rendement du transformateur lorsqu'il débite sur une charge absorbant la moitié du courant nominal, toujours avec un $\cos\varphi = 0,8$

- $\Delta V_2 = V_{20} - V_2 \approx R_s I_2 \cos\varphi_2 + X_s I_2 \sin\varphi_2 \rightarrow V_2 = V_{20} - (R_s I_2 \cos\varphi_2 + X_s I_2 \sin\varphi_2)$
 An : $V_2 = 133 - (0.15 * 8.65 * 0.8 + 0.378 * \sin(\arccos 0.8)) = 130$

- $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos\varphi_2}{U_2 I_2 \cos\varphi_2 + R_s I_2^2 + P_{fer}}$

$$\text{An : } \eta = 0.94$$

Vidéos learning

Transformateur : Bilan de puissance

V2



Lien hypertexte



Chapitre II

TRANSFORMATEUR TRIPHASE

1. Intérêt.

Les transformateurs triphasés de grande puissance sont utilisés pour le transport et la distribution de l'énergie électrique. Ils sont installés dans :

- Les centrales de productions ;
- Les postes d'interconnexion ;
- Les postes de distribution ;
- Sur les poteaux ;

2. Constitution du transformateur triphasé

On distingue deux configurations :

- Trois transformateurs monophasés séparés sont connectés de manière appropriée pour un fonctionnement triphasé (fig. 2.1).
- Un seul transformateur triphasé dans lequel le circuit magnétique et les enroulements des trois phases sont fusionnés en une seule structure (fig. 2.2).

Les trois transformateurs monophasés peuvent être utilisés comme un transformateur triphasé lorsque leurs enroulements primaire et secondaire sont connectés l'un à l'autre. Configuration rencontrée plus dans le réseau américain.

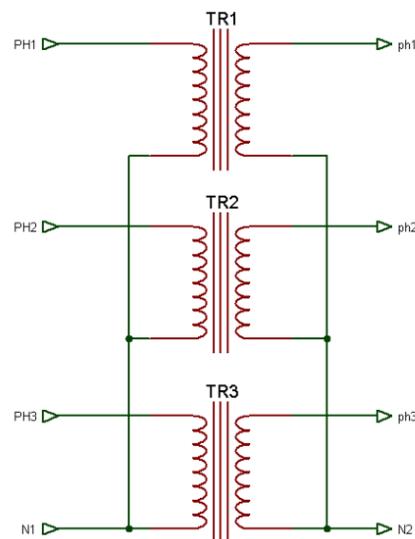


Figure 2.1. Transformateur triphasé formé par trois transformateurs monophasés identiques

La mise en commun d'un noyau permet de réduire la masse totale de fer. En régime équilibré, le flux au travers du noyau central est nul puisqu'il est la composition de trois flux équilibrés. Ce noyau n'est donc pas nécessaire (fig. 2.2).

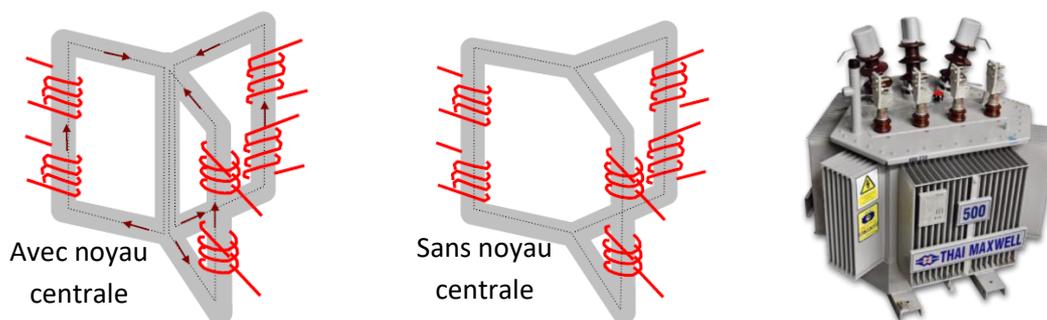


Figure 2.2. Disposition "3D" des trois noyaux

La disposition "en 3D", bien que symétrique, donne à un tel transformateur un encombrement trop important. Aussi, préfère-t-on réaliser une carcasse dont les trois noyaux sont coplanaires "2D". Cette disposition, moins encombrante, n'est plus symétrique.

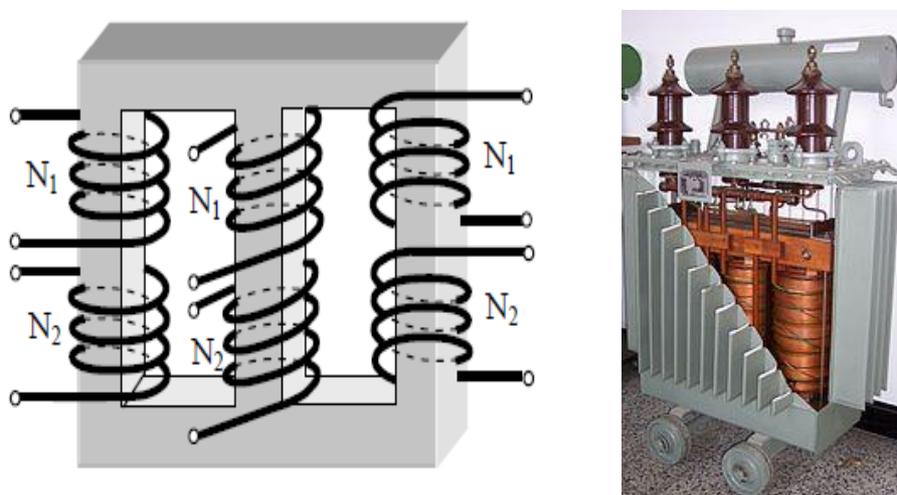


Figure 2.3. Transformateur triphasé à 3 colonnes

Cette disposition, moins encombrante, n'est plus symétrique. La réluctance du circuit magnétique vue par chaque bobine diffère suivant la colonne considérée.

Les transformateurs à *trois colonnes* (fig. 2.3) sont dits à **flux liés** : en effet, le flux de chacune des colonnes dépend des courants circulant dans tous les enroulements du transformateur. Dans le cas des puissances élevées le circuit magnétique peut comporter quatre ou *cinq noyaux* : les trois noyaux sont bobinés et les deux noyaux extrêmes servent de retour aux flux magnétiques. Comme pour un ensemble de trois transformateurs monophasés dans certains régimes de fonctionnement.

Il existe des circuits magnétiques à 4 voire 5 colonnes (type cuirassé). Les colonnes supplémentaires ne portent pas de bobinage mais sont là pour équilibrer les flux, les trois flux sont indépendants (**c'est-à-dire libres**) ce qui présente un intérêt lors de la marche en régime de charge déséquilibrée.

En résumé, les transformateurs triphasés sont classés en deux catégories :

- à flux libres
 - trois transformateurs monophasés
 - transformateur à cinq colonnes
- à flux liés
 - transformateur à trois colonnes

L'alimentation en transformateur triphasé présente de nombreux avantages par rapport aux trois unités monophasées, car elle nécessite très peu d'espace et est également plus légère, plus petite, moins chère et a un meilleur rendement.

2.1 Repérages et notations

On adopte la notation suivante :

- Une ligne correspond aux enroulements sur un noyau.
- Les lettres en majuscules (**A, B, C**) désignent les bornes **hautes tension**
- Les lettres en minuscules (**a, b, c**) désignent les bornes **basses tension**.
- Les bornes désignées par la même lettre correspondent aux **bornes homologues**.

On suppose les enroulements bobinés dans le même sens. Ainsi les tensions V_A et V_a sont en phases.

Les couplages effectués au primaires et secondaires sont résumés par un ensemble de deux lettres

- La première lettre désigne le couplage Haute Tension et sera notée en majuscule
(**Y** : étoile ; **D** : triangle ; **Z** : zig-zag)
- La deuxième lettre désigne le couplage Basse Tension et sera notée en minuscule
(**y** : étoile ; **d** : triangle ; **z** : zig-zag)
- L'éventuelle lettre **N** ou **n** : indique la présence du neutre

Les lettres cursives sont utilisées pour les valeurs instantanées, les lettres majuscules droites pour les valeurs efficaces ; les majuscules soulignées correspondent aux nombres complexes associés. v et j sont réservées aux valeurs simples, u aux valeurs composées et i au courant de ligne.

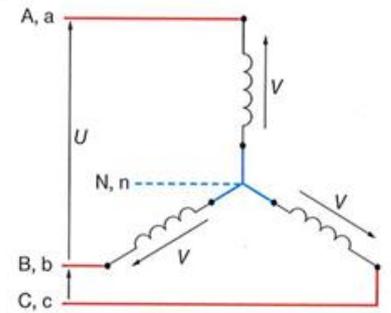
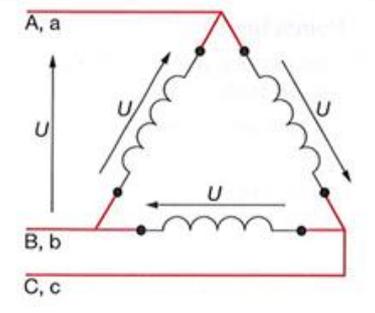
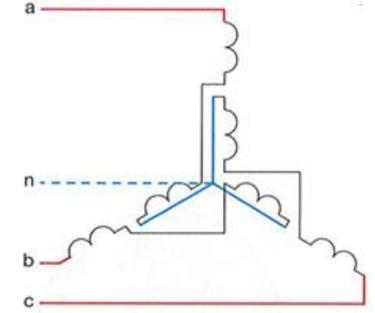
La convention Récepteur est adoptée pour l'orientation du primaire et celle Générateur pour le secondaire.

2.2 Coulage des enroulements

Le primaire et le secondaire du transformateur triphasé comportent chacun trois phases à coupler pour être reliés à des lignes trois ou quatre fils.

- **Le couplage étoile** permet la sortie du neutre ce qui est très utile en basse tension, et par conséquent mettre à disposition un réseau de tensions simple et un réseau de tensions composées, mais également il est utile pour évacuer le courant de neutre dans le cas d'une charge déséquilibrée.
- **Le couplage triangle** son emploi est limité à la distribution/transport de l'énergie électrique.
- Dans le cas du **couplage zig-zag**, le secondaire du transformateur est découpé en 2 enroulements. Il permet de limiter l'influence des déséquilibres de courants.

Les diverses possibilités de couplage entre le primaire et le secondaire va amener des déphasages différents entre le primaire et le secondaire.

| Couplage étoile | Couplage Triangle | Couplage Zig-Zag |
|---|--|---|
|  |  |  |
| <p>Utiliser bien au primaire qu'au secondaire, on retrouve la tension simple aux bornes d'un enroulement et la tension composée entre phases et. Le point commun des enroulements peut être utilisé comme neutre.</p> | <p>Utiliser bien au primaire qu'au secondaire, on retrouve la tension composée entre phases et aux bornes des enroulements. Il n'est pas possible de sortir le neutre.</p> | <p>Uniquement utilisé au secondaire, il permet de réduire le déséquilibre des phases sur le réseau HTA. Ce couplage permet de disposer d'un point de neutre</p> |

Pour le transformateur triphasé (fig. 2.4) on distingue six possibilités de couplage :

- **Y-y** : étoile –étoile
- **Y-d** : étoile-triangle
- **Y-z** : étoile-zigzag
- **D-y** : triangle- étoile
- **D-d** : triangle –triangle
- **D-z** : triangle-zig-zag

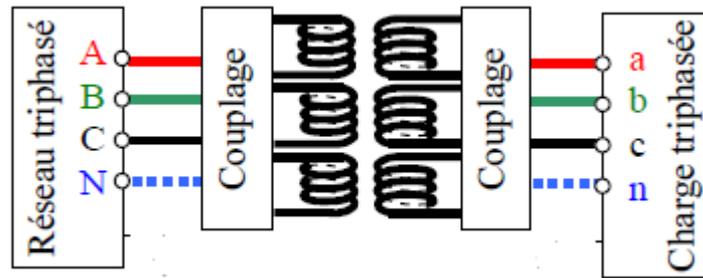


Figure 2.4. Couplage des enroulements

Le choix du couplage repose sur plusieurs critères :

- La charge nécessite la présence du neutre (par exemple réseau BT de l'ONEE). Le secondaire doit être connecté soit en étoile soit en zig-zag.
- Le fonctionnement est déséquilibré (courant de déséquilibre dans le neutre I_n est supérieur à 10% le courant nominal), le secondaire doit être couplé en zig-zag.
- Côté haute tension on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spire à utiliser).
- Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle

3. Modèle d'un transformateur triphasé

3.1 Rapport de transformation

Comme en monophasé, le rapport de transformation est le rapport des tensions à circuit secondaire ouvert.

$$m = U_{20}/U_{10} = V_{20}/V_{10}$$

Il s'obtient lors de l'essai à vide. La valeur est la même que l'on prenne les deux tensions simples ou les deux tensions composées (mais pas un mélange de tensions composée et simple). Alors qu'en monophasé "m" valait également que le rapport des nombres de spires, en triphasé, il faut également tenir compte du couplage.

Exemple 1 : Y-y

En se référant à la figure 3.5 et sachant que la tension aux bornes d'un enroulement est proportionnelle au nombre de spires (d'après la relation de Boucherot). On aura donc :

$$m = V_{a0} / V_A = N_2 / N_1$$

On démontre de la même manière que le rapport de transformation pour un couplage D-d est égal aussi :

$$m = U_{ab0} / U_{AB} = N_2 / N_1$$

Exemple 2 : D-y

En se référant à la figure 3.6 on démontre que

$$m = U_{ab0} / U_{AB} = \sqrt{3} V_{a0} / U_{AB} = \sqrt{3} N_2 / N_1$$

Si N_1 et N_2 sont les nombres de spires par bobine du primaire et du secondaire (en Zigzag 2 fois N_2 par phase) suivant les couplages nous aurons :

| Primaire \ Secondaire | Etoile | Triangle |
|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Etoile | $\frac{N_2}{N_1}$ | $\sqrt{3} \frac{N_2}{N_1}$ |
| Triangle | $\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1}$ | $\frac{N_2}{N_1}$ |
| Zig-Zag | $\sqrt{3} \frac{N_2}{N_1}$ | $3 \frac{N_2}{N_1}$ |

3.2 Schéma équivalent

Le fonctionnement étant équilibré, l'étude d'un transformateur triphasé peut être ramenée à l'étude d'un transformateur monophasé équivalent par la méthode de Kapp.

3.2.1 Méthode du transformateur colonne

On ramène les données à une colonne (tension par colonne, courant par colonne et puissances par colonne) tout en tenant compte des couplages.

- On résout le problème au niveau d'une colonne
- On exprime les résultats finaux en fonction des grandeurs des lignes

Remarque : Cette méthode est inapplicable lorsqu'on ignore le couplage. Elle est délicate si le couplage du secondaire est en zig-zag

La figure 2.5 donne le schéma équivalent par colonne vu du secondaire

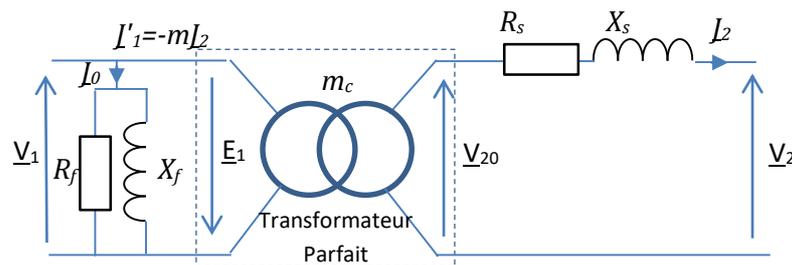


Figure 2.5. Schéma équivalent par colonne dans l'hypothèse de Kapp.

Les éléments du schéma équivalent par colonne sont donnés par :

$$m_c = V_{20} / V_1 = N_2 / N_1.$$

$$R_s = \frac{P_{1cc}}{3J_{2cc}^2} = m_c^2 \frac{P_{1cc}}{3J_{1cc}^2}$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = m_c \frac{V_{1cc}}{J_{2cc}}$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

La chute de tension peut être déterminée de la même manière qu'avec un transformateur monophasé.

3.2.2 Méthode des dipôles équivalents de Thévenin

Cette méthode est applicable même si l'on ignore le couplage. Dans ce cas, on considère les données par phase (tension étoilée, courant de ligne et puissance et pertes par phase).

Chaque phase sera remplacée par son dipôle de Thévenin équivalent (fig. 2.6). Peu importe alors le couplage réel du transformateur.

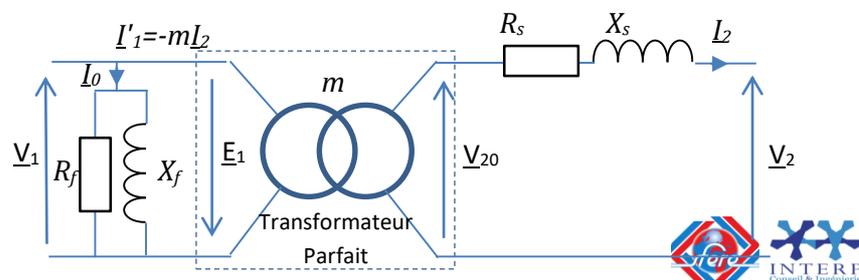


Figure 2.6. Dipôle de Thévenin équivalent par phase dans l'hypothèse de Kapp.

Les éléments du schéma dipôle de Thévenin équivalent sont donnés par :

$$m = V_{20} / V_1 = N_2 / N_1.$$

$$R_s = \frac{P_{1cc}}{3I_{2cc}^2} = m^2 \frac{P_{1cc}}{3I_{1cc}^2}$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = m \frac{V_{1cc}}{I_{2cc}}$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

Les éléments du schéma équivalent se déterminent eux aussi à partir de deux essais à puissance réduite :

- **Essai à vide sous tension nominale**

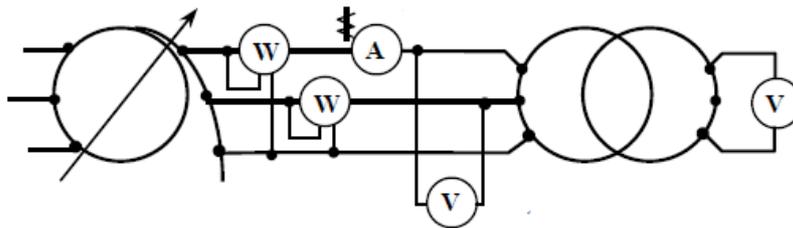


Figure 2.7. Essai à vide d'un transformateur triphasé

Comme en monophasé l'essai à vide (fig. 2.7) sous tension nominale va permettre de déterminer

- Le rapport de transformation **m**
- La résistance **R_f** modélisant les pertes fer
- La réactance magnétisante **X_f**.

En effet, à vide, le courant est faible donc les pertes Joules (proportionnelle à I^2) sont négligeables.

La courant secondaire est nul ($I_2 = 0$) et les pertes par effet Joule se réduisant à

$$P_{j0} = 3R_1 \cdot I_{10}^2$$

La puissance $P_{10} = P_{j0} + P_{fer}$ est peu différente des pertes dans le fer ($P_{j0} \ll P_{fer}$)

D'où la résistance

$$R_f = 3V_{1N}^2/P_{10} = U_{1N}^2/P_{10}$$

La puissance réactive primaire peut être calculée par

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{(\sqrt{3}U_{1N}I_{10})^2 - P_{10}^2}$$

Cette puissance représente les pertes réactives Q_{fer} dans le fer car la puissance réactive de fuites primaire est négligeable. Nous en déduisons

$$X_f = 3V_{10}^2/Q_{10} = U_{10}^2/Q_{10}.$$

- **Essai en court-circuit à courant nominal sous tension réduite**

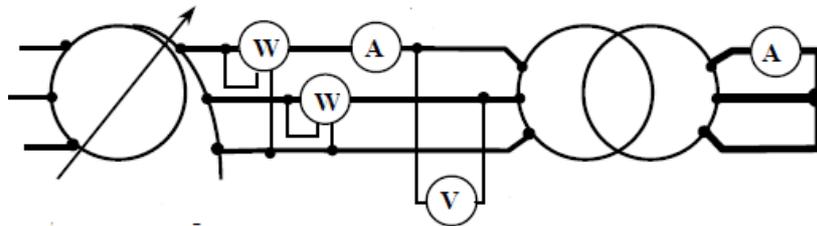


Figure 2.8. Essai en court-circuit du transformateur triphasé

On mesure : I_{1cc} , U_{1cc} et P_{1cc} .

Les pertes Joules lors d'un essai en court-circuit (fig. 2.8) sous tension réduite permettent de déterminer la résistance modélisant les pertes joules ramenées au secondaire R_s .

La puissance secondaire étant nulle, au primaire $P_{1cc} = P_{fer_cc} + P_{jcc}$. Les pertes dans le fer étant proportionnelles au carré de la tension et U_{1cc} n'excédant pas 10% de la tension nominale, elles sont négligeables devant les pertes par effet Joule ; nous en déduisons

$$P_{1cc} = P_{jcc} = 3R_s I_{2cc}^2$$

On obtient :

$$R_s = \frac{P_{1cc}}{3I_{2cc}^2} = m^2 \frac{P_{1cc}}{3I_{1cc}^2}$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = m \frac{U_{1cc}}{I_{2cc}} = m^2 \frac{U_{1cc}}{I_{1cc}}$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

- **Chute de tension**

On détermine graphiquement (fig.2.8) ou par calcul la chute de tension ΔV_2 .

$$\underline{V}_{20} = \underline{V}_2 + jX_s \underline{I}_2 + R_s \underline{I}_2$$

$$i_1 + i_{10} = -mi_2$$

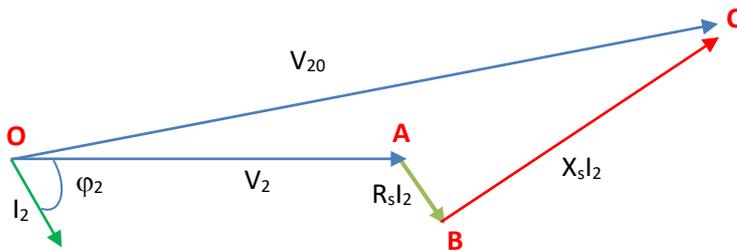


Figure 2.9. Diagramme vectoriel.

La chute de tension s'écrit : $\Delta V_2 \approx R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2$

La chute de tension entre phases s'écrira alors : $\Delta U_2 = \sqrt{3} \Delta V_2$.

3.3 Rendement

Le rendement est le rapport :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P_{\text{ertes}}}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{3V_2 I_2 \cos \varphi_2}{3V_2 I_2 \cos \varphi_2 + 3R_s I_2^2 + P_{fer}} = \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 + 3R_s I_2^2 + P_{fer}}$$

4. Déphasage et indice horaire

Pour un transformateur monophasé les tensions au primaire et au secondaire ne peuvent être déphasées que de 0 ou 180° suivant les sens d'enroulement.

Pour un transformateur triphasé alimenté par un réseau équilibré, le déphasage des tensions HT et BT peuvent prendre toutes les valeurs multiples de 30°. Ce déphasage est un angle multiple de 30° ou $\pi/6$ rad, ce qui donne 12 possibilités. On note θ le **retard** d'une tension côté basse tension sur son homologue haute tension. A ce déphasage, on associe un nombre de 0 à 11 qui est l'**indice horaire** (I_h). Pour un déphasage nul, l'indice horaire est 0.

Un transformateur triphasé peut être vu comme composé de 3 transformateurs monophasés.

On peut alors parler de la colonne A qui supporte les tensions primaire V_A et secondaire V_a puis la colonne B puis la colonne C. Ces 3 colonnes forment donc le transformateur triphasé.

Comme pour le transformateur monophasé, chaque colonne du transformateur triphasé présente des tensions qui si elles pointent sur les bornes homologues seront en phase. Donc V_A en phase avec V_a , V_B avec V_b , V_C avec V_c .

On peut déterminer l'indice horaire I_h :

- Soit à partir du schéma des connections
- Soit pratiquement par des essais

4.1 Détermination de l'indice horaire à partir du schéma

On dispose du schéma des connections internes d'un transformateur et il est question de déterminer son indice horaire.

Exemple 1 : couplage Yy0

Les enroulements primaires sont alimentés par un réseau triphasé hautes tensions A,B,C égales aux tensions simples aux bornes des enroulements. De même les enroulements secondaires fournissent un réseau triphasé basse tension a,b,c égales aux tensions simples aux bornes des enroulements. Sachant que V_A et V_a sont en phase on a donc les tensions primaires et secondaires en phase (fig.2.10).

L'indice horaire est 0. On note ce couplage Yy0.

Par permutation circulaire des phases A, B, C ou des phases a, b, c on obtient l'indice horaire 4 ou 8.

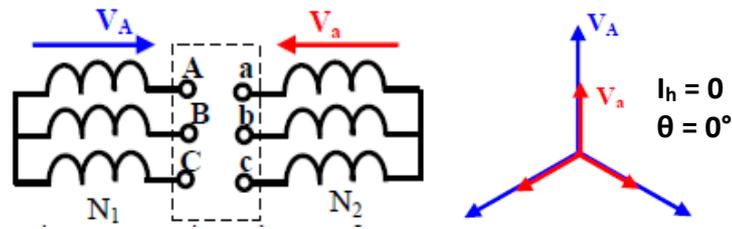


Figure 2.10. Couplage Yy0

Exemple 2 : couplage Dyn 11

Les enroulements primaires sont alimentés par un réseau triphasé hautes tensions A,B,C. Aux bornes des enroulements on a des tensions composées : $U_{AB} = V_A - V_B$.

Les enroulements secondaires fournissent un réseau triphasé basses tensions a,b,c de tensions simples aux bornes des enroulements. Sachant que U_{AB} et V_a sont en phase, on positionne les tensions composées du primaire et on oriente les tensions simples du secondaire : le déphasage de "a" par rapport à "A" donne l'indice horaire 11 (330°). On note ce couplage Dyn11 (fig.2.11).

Par permutation circulaire des phases A,B,C ou des phases a,b,c on obtient l'indice horaire 7 ou 3.

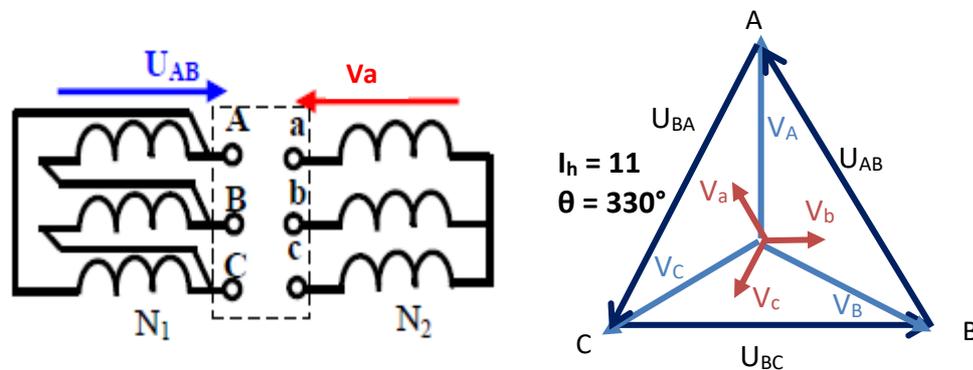


Figure 2.11. Couplage Dy11

Exemple3 : couplage Yz 11

Les enroulements primaires sont alimentés par un réseau triphasé hautes tensions A,B,C égales aux tensions simples aux bornes des enroulements. Les enroulements secondaires fournissent un réseau triphasé basse tension a,b,c telle que $\underline{V}_a = \underline{V}_{a1} - \underline{V}_{b2}$. Sachant que V_A et V_{a1} sont en phase et V_B et V_{b2} . La construction du diagramme vectorielle l'indice horaire 11 (330°). On note ce couplage Yz 11 (fig.2.12).

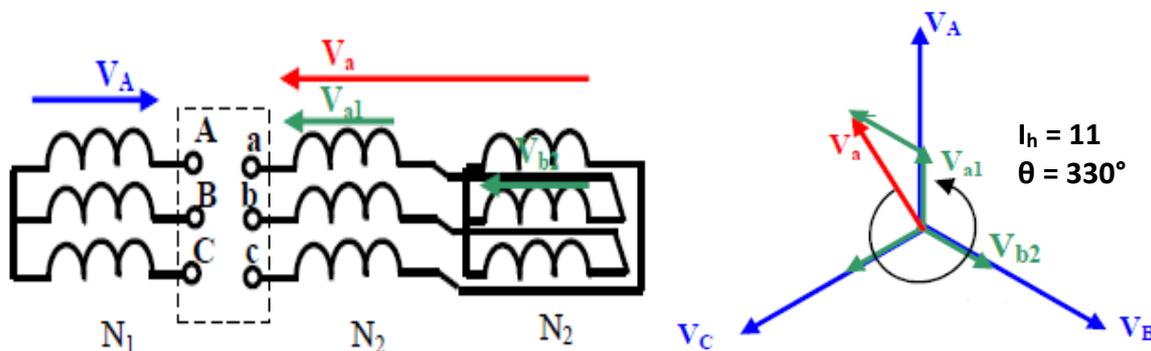


Figure 2.12. Couplage Yz11

4.2 Détermination pratique de l'indice horaire

4.2.1 Méthode à l'oscilloscope

Cela revient à mesurer le déphasage θ entre deux tensions homologues à l'aide d'un oscilloscope (fig. 2.13) et à en déduire l'indice horaire I_h .

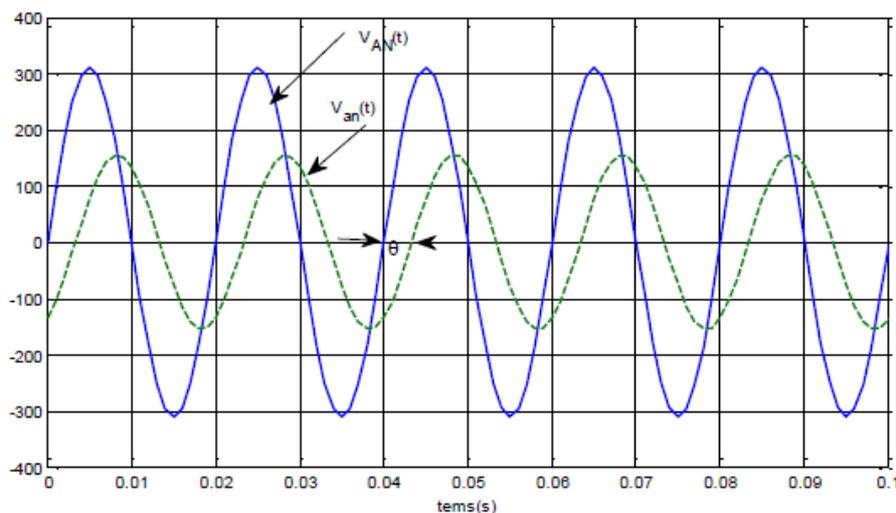


Figure 2.13. Détermination de l'indice horaire à l'oscilloscope

4.2.2 Méthode des électriciens

La méthode des électriciens est la plus simple car elle nécessite juste l'utilisation d'un voltmètre.

- On relie entre elles deux bornes homologues (par exemple A et a)

- On mesure les tensions composées au primaire : $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$
- On mesure les tensions mixtes entre les bornes HT et BT : U_{Ab} ; U_{Bb} ; U_{Cb} ; U_{Ac} ; U_{Bc} ; U_{Cc} .

Ces mesures permettent de construire le diagramme vectoriel et d'enduire le déphasage θ (fig. 2.14)

- On choisit une échelle
- On construit le triangle des tensions primaires (A.B.C)
- Le potentiel **A** est celui de **a**, donc on construit "a" confondu avec "A"
- Pour avoir le point **b**, il suffit de tracer les 3 les arcs de cercles de rayon U_{Ab} ; U_{Bb} ; U_{Cc} et d'origines respectivement A.B et C.
- Mesurer le déphasage θ , angle entre U_{AB} et U_{Ab} .

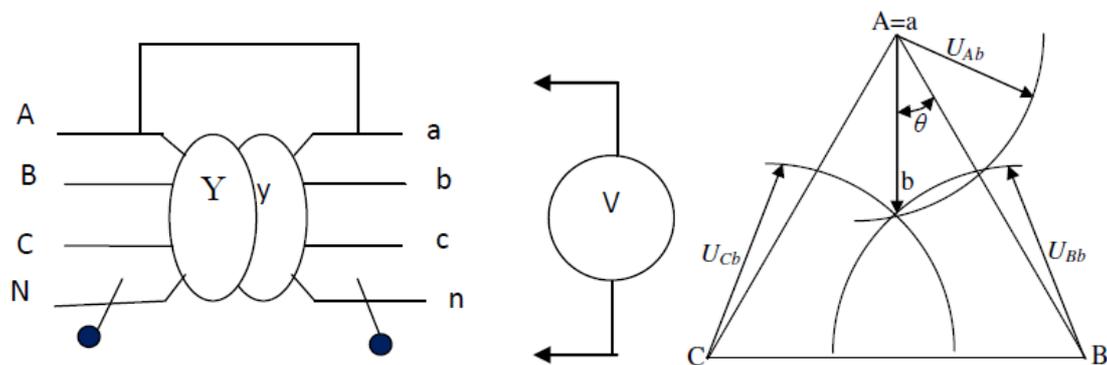


Figure 2.14. Méthode des électriciens

Cette méthode a l'avantage d'une interprétation simple mais ne peut être appliquée qu'aux transformateurs possédant des bobinages HT et BT isolés ; elle ne peut être appliquée à un auto-transformateur car la liaison **A-a** court-circuiterait une partie du bobinage.

La figure 2.15 donne les couplages usuels des transformateurs triphasés

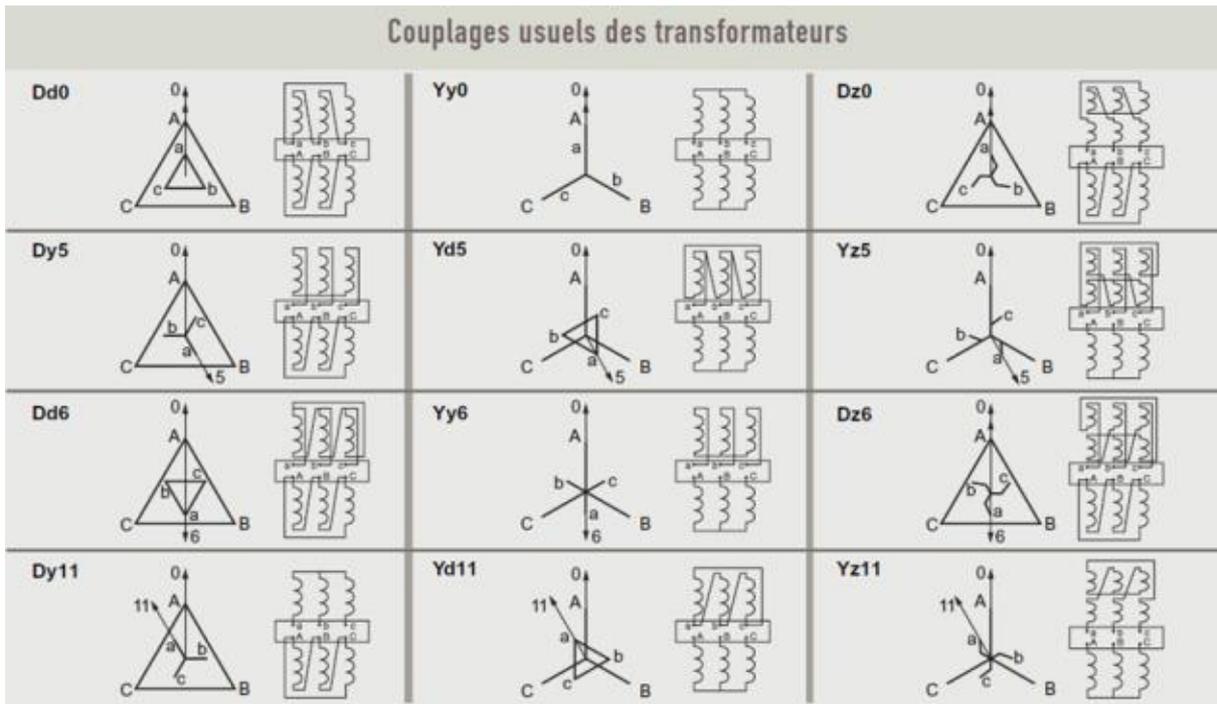


Figure 2.15. Couplages usuels des transformateurs

Vidéos learning

Indice horaire

V2



LES INDICES HORAIRES DES TRANSFORMATEURS TRIPHASES

- 1) COUPLAGE DES ENROULEMENTS
 - A) Couplage étoile
 - B) Couplage triangle
 - C) Couplage zig-zag
- 2) DESIGNATION DES COUPLAGES
 - 1) Première lettre
 - 2) Deuxième lettre
 - 3) Indice horaire
- 3) COUPLAGES USUELS

Cette présentation se donne pour objectif d'aborder le transformateur triphasé dans le cadre de la distribution de l'énergie électrique. Elle s'intéressera notamment à décrire les différents couplages utilisés, en conformité avec la norme NFC 52100, et à étudier les indices horaires qui sont nécessaires pour mettre en parallèle deux ou plusieurs transformateurs comme par exemple pour l'extension d'une installation électrique existante.

0:01 / 3:18



Lien hypertexte



5. Marche en parallèle de deux transformateurs

Par fonctionnement en parallèle, nous entendons que deux transformateurs ou plus sont connectés à la même d'alimentation du côté primaire et à une charge commune du côté secondaire.

Une telle exigence est fréquemment rencontrée dans la pratique. Les raisons qui nécessitent un fonctionnement en parallèle sont les suivantes

- Non-disponibilité d'un seul grand transformateur pour répondre à l'exigence de charge totale.
- Lorsque des problèmes de transport limitent l'installation de gros transformateurs sur le site, il peut être plus facile de transporter les plus petits sur le site et de les faire fonctionner en parallèle.
- La demande de puissance peut avoir augmenté au fil du temps, nécessitant une augmentation de la capacité. D'autres transformateurs connectés en parallèle seront alors mis en service.
- Lorsque la fluctuation de la consommation (le long de la journée, de la semaine, de l'année) est importante, il est recommandé d'utiliser le nombre de transformateurs adapté à la puissance nécessaire afin de les faire fonctionner au plus près de leur point nominal (meilleur rendement) ;
- Soit parce qu'on veut réaliser un réseau « maillé ».
- Pour assurer une meilleure fiabilité. Même si l'un des transformateurs tombe en panne ou est retiré pour maintenance/réparation, la charge peut continuer à être alimentée (disposer d'un minimum d'énergie).

Pour que l'on puisse **relier deux à deux les bornes homologues secondaires** sans que circulent des courants importants entre les secondaires, **il faut que ces bornes soient deux à deux aux mêmes potentiels**. On en déduit les conditions nécessaires au couplage des transformateurs.

- Même rapport de transformation de tension des transformateurs.
- Même polarité. Le terme polarité appliqué aux transformateurs est utilisé pour indiquer la relation de phase entre le primaire et les enroulements secondaires d'un transformateur donné, connexion des bornes homologues.
- Même ordre de succession des phases (en triphasé).
- Répartition de la puissance de la charge sur les transformateurs en parallèle en fonction de leur puissance apparente.

5.1 Transformateurs monophasés en parallèle

Lorsque deux transformateurs ou plus fonctionnent en parallèle (fig. 2.16), ils doivent satisfaire aux conditions suivantes pour des performances satisfaisantes. Ce sont les conditions de **fonctionnement en parallèle des transformateurs**.

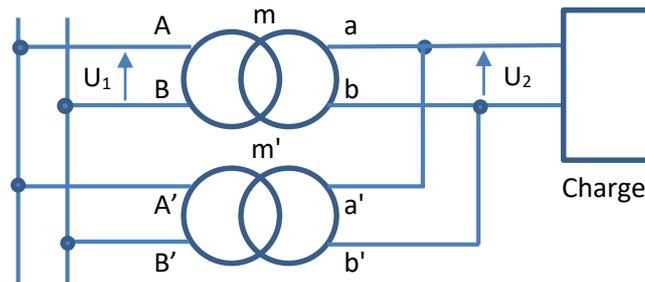


Figure 2.16. Transformateurs monophasés en parallèle.

Pour que le couplage soit envisageable il faut impérativement que les transformateurs aient

5.1.1 Rapports de transformation :

Pendant le fonctionnement à vide le récepteur est déconnecté mais les deux secondaires restent branchés en parallèle. Pour qu'aucun courant ne circule entre les appareils il est nécessaire que, avant la mise en parallèle des secondaires, la tension U_{20} entre les bornes a et b et la tension U'_{20} entre les bornes a' et b' soient égales :

$$\mathbf{A\ vide} : U_{20} = m \cdot U_1 \text{ et } U'_{20} = m' \cdot U_1$$

Pour avoir $U_{20} = U'_{20}$ il faut avoir le **même rapport de transformation** $m = m'$.

Si les secondaires n'affichent pas la même tension, leur mise en parallèle entraîne un courant de circulation entre les secondaires. Un courant de circulation réfléchi apparaît du côté primaire. Ainsi, même sans connecter une charge, un courant considérable peut être tiré par les transformateurs et ils produisent des pertes.

5.1.2 Polarité

Il faut avoir même phases des point homologues. Connection des points homologues $a-a'$ et $b-b'$.

5.1.3 Répartition de la charge.

La répartition de la charge entre les transformateurs en parallèle doit respecter la puissance nominale de chacun d'entre eux.

En charge :

Chaque transformateur pouvant être décrit par son schéma équivalent (fig. 2.17).

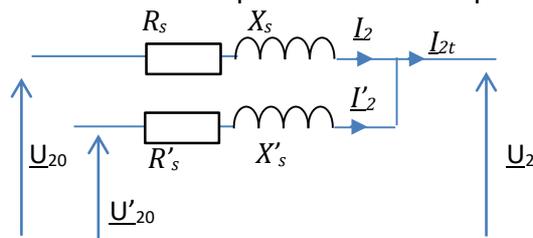


Figure 2.17. Transformateurs en parallèle

L'égalité des tensions secondaires implique l'égalité des chutes de tensions $Z'_s \cdot I'_2 = Z_s \cdot I_2$

Les courants se répartissent proportionnellement aux impédances internes.

La loi des nœuds impose : $I_{2t} = I'_{2} + I_2$

A charge nominale : $m.U_{1cc} = Z_s.I_{2n}$ et $m.U'_{1cc} = Z'_s.I'_{2n} \Rightarrow U_{1cc} = U'_{1cc}$.

La répartition de la charge se traduit par l'**égalité des tensions de court-circuit**. Cette condition est difficile à réaliser avec des transformateurs de puissance très différents. Ainsi, il est déconseillé de brancher en parallèle deux transformateurs lorsque la puissance de l'un est supérieure à deux fois celle de l'autre.

Par conséquent, pour partager la charge proportionnellement à leurs caractéristiques, les transformateurs devraient avoir une impédance inversement proportionnelle à leurs caractéristiques.

5.2 Transformateurs triphasés en parallèle

Deux transformateurs triphasés ou plus, ou deux groupes ou plus constitués de trois unités monophasées, peuvent être connectés en parallèle pour d'augmenter la puissance fournie. En plus des exigences énumérées ci-dessus pour la mise en parallèle des transformateurs monophasés, les phases entre les hautes tensions et basses tensions doivent être les mêmes pour les deux transformateurs. L'exigence d'égalité des phases des bornes homologues doit être respecté pour la mise en parallèle. C'est à dire le **même indice horaire** des transformateurs.

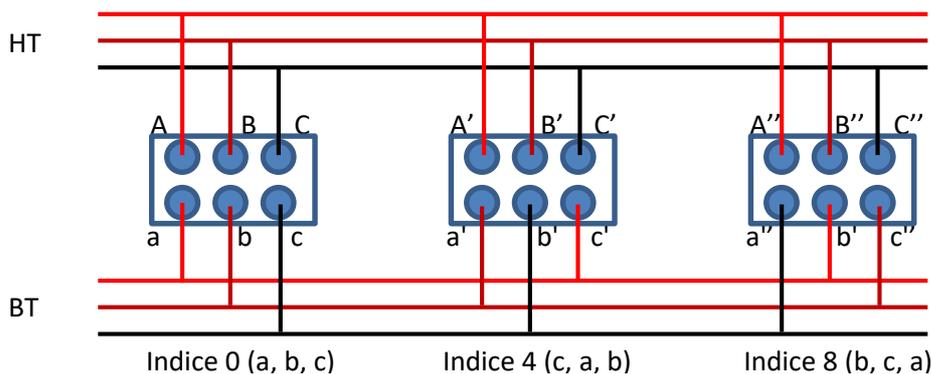
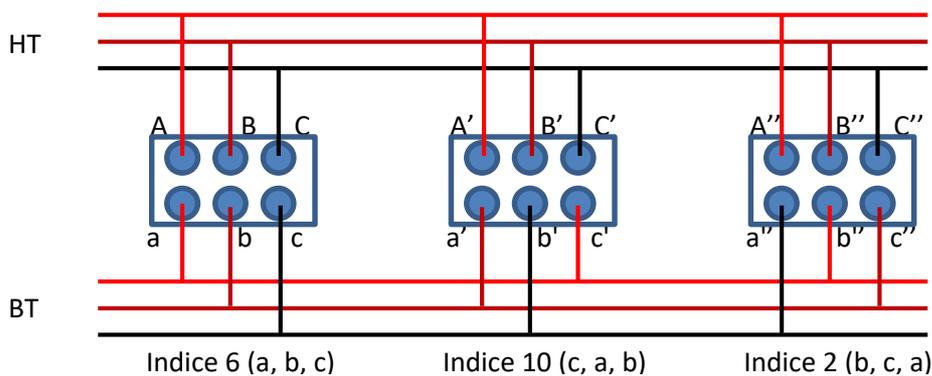
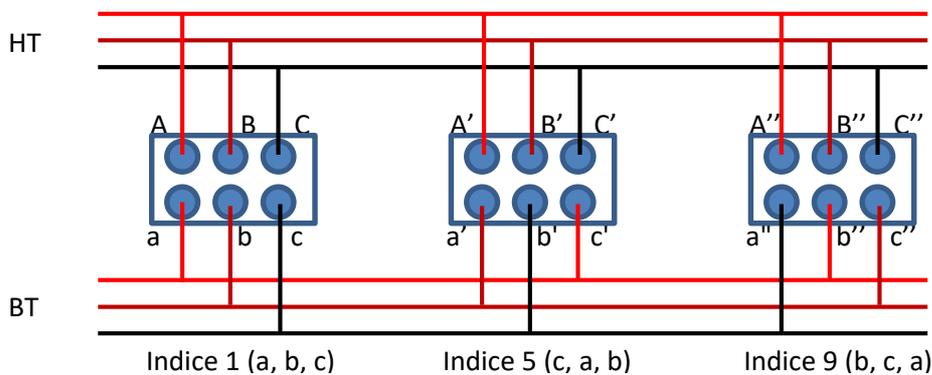
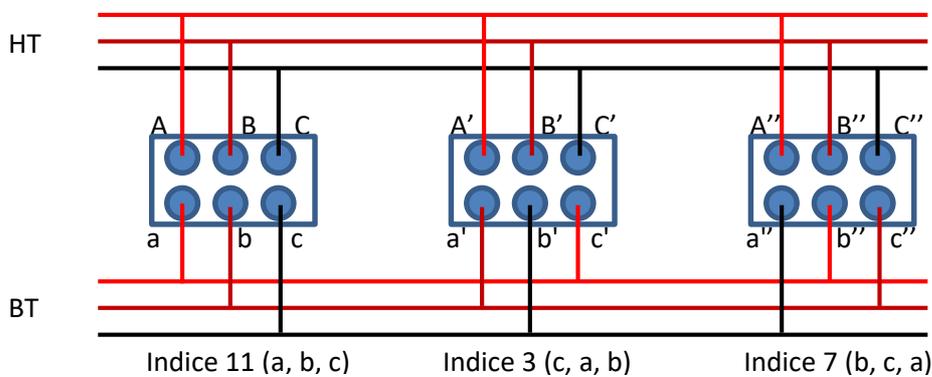
Il est tout de même possible de coupler des transformateurs ayant des indices horaires différents à condition qu'ils appartiennent au même groupe de couplage. Ainsi le déphasage créé par le couplage des enroulements peut être corrigé par une permutation circulaire des phases dans le sens direct.

On peut classer les couplages en 4 groupes selon leur indice horaire

| Groupe | Indices horaires | Couplage |
|------------|------------------|--------------|
| I | 0, 4, 8 | Yy ; Dd ; Dz |
| II | 2, 6, 10 | Yy ; Dd ; Dz |
| III | 1, 5, 9 | Dy ; Yz ; Yd |
| IV | 3, 7, 11 | Dy ; Yz ; Yd |

Toutefois les couplages les plus utilisés sont les couplages d'indice 0, 6, 5 et 11

Les appareils appartenant à un même groupe, dont les indices diffèrent de 4 ou 8 peuvent fonctionner en parallèle en connectant ensemble d'un côté (haute ou basse tension) les bornes marquées de la même lettre et en reliant de l'autre côté les couples de bornes marqués de lettres différentes qui présentent des tensions en phase (fig. 2.18).

Groupe I (0 ; 4 ; 8)

Groupe II (2 ; 6 ; 10)

Groupe III (1 ; 5 ; 9)

Groupe IV (3 ; 7 ; 11)

Figure 2.18. Groupement en parallèle des transformateurs

D'après le Document Schneider

- Si les puissances des transformateurs sont différentes, la puissance totale disponible est légèrement inférieure (maxi 10 %) à la somme des puissances des appareils couplés ;
- la puissance du plus gros transformateur ne doit pas dépasser deux fois celle du plus petit ;
- les transformateurs doivent être alimentés par un même réseau ;
- les connexions doivent être de même longueur et avoir les mêmes caractéristiques entre les bornes BT des différents appareils et le disjoncteur de couplage ;
- les indices horaires compatibles ;
- les tensions de court-circuit doivent être identiques (à 10 % près) ;
- la différence entre les tensions obtenues au secondaire entre les différents appareils ne doit pas être supérieure à 0,4 %.

6. Plaque signalétique

La plaque signalétique nous renseigne sur les principales caractéristiques du transformateur

- Nom du constructeur
- Année de Fabrication
- Le nombre de phases du transformateur
- La puissance apparente nominale en VA
- La fréquence nominale d'utilisation du transformateur
- Couplage des enroulements du transformateur et l'indice horaire (Exemple : Dy11).
- La tension(s) primaire(s) nominale(s) possibles(s) V1
- La tension de court-circuit en pourcentage de la tension nominale.
- Les courants nominaux primaire et secondaire.
- Le mode de refroidissement

La figure 2.19 donne un exemple de plaque signalétique d'un transformateur triphasé du constructeur "France transfo"

- Puissance 400 kVA
- Fréquence 50 Hz
- Tension de court-circuit $U_{cc}\% = 4.00\%$
- Couplage Dyn11 (primaire en triangle ; secondaire en étoile avec neutre sortie ; indice horaire 11)
- Tension Primaire
 - Pos 1 : 20.5 kV
 - Pos2 : 20 kV
 - Pos3 : 19.5 kV
- Tension secondaire : 410 V
- Courant primaire 11.5 A
- Courant secondaire 563.3 A
- Refroidissement ONAN (transformateur immergé dans l'huile)



Figure 2.19. Plaque signalétique

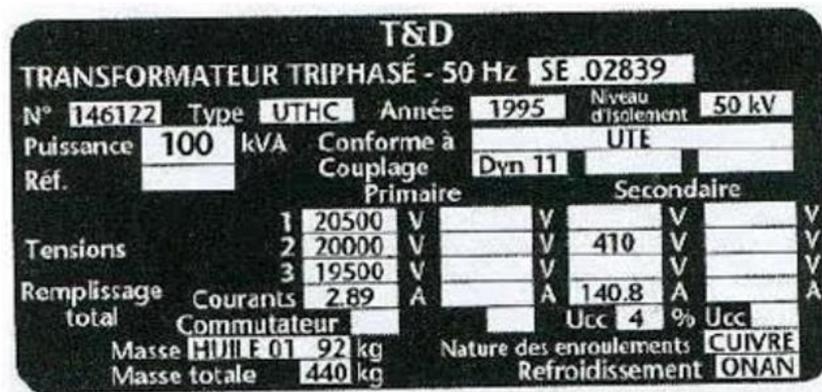
7. Activités d'apprentissage

7.1 Énoncés

Exercice 1

En se référant à la plaque signalétique de la figure 2.20.

1. Donnez la tension au secondaire du transformateur
2. Si le transformateur est en position 2, donnez sa tension au primaire
3. La tension au primaire étant de 20kV, calculez son rapport de transformation
4. Donnez le couplage du transformateur
5. Donnez sa tension de court-circuit en %
6. Quel est le courant nominal au primaire ?
7. Quel est le courant nominal au secondaire ?



| Tensions | | Courants | | Ucc | |
|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| Primaire | Secondaire | Primaire | Secondaire | Primaire | Secondaire |
| 1 | 20500 V | 2.89 A | 140.8 A | 4 % | |
| 2 | 20000 V | | | | |
| 3 | 19500 V | | | | |

T&D
TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ - 50 Hz SE .02839
 N° 146122 Type UTHC Année 1995 Niveau d'isolement 50 kV
 Puissance 100 kVA Conforme à UTE
 Réf. Couplage Dyn 11
 Masse CHUTE 01 92 kg Nature des enroulements CUIVRE
 Masse totale 440 kg Refroidissement ONAN

Figure 2.20. Plaque signalétique

Exercice 2

Un transformateur D/yn a un rapport de nombres de spires $m_c = N_2/N_1 = 0.044$. La tension primaire $U_1 = 5$ kV.

1. Donner les tensions disponibles au secondaire
2. Le secondaire débite un courant de 100 A. Calculer le courant dans un enroulement primaire et le courant dans la ligne.

Exercice 3

Soit le transformateur triphasé : D/y ; 600 kVA ; 660 V / 11 kV.

Les essais à vide et en court-circuit ont donné :

- essai à vide : $U_{1n} = 660$ V, $U_{20} = 11$ kV, $P_{10} = 4.8$ kW, $I_{10} = 16$ A.
- essai en court-circuit : $U_{1cc} = 50$ V, $I_{2cc} = 30$ A, $P_{1cc} = 8.2$ kW.

1. Déterminer les paramètres m , R_f , $X\mu$, R_s , X_s du dipôle de Thévenin correspondant.
2. Donner la tension aux bornes d'une charge absorbant le courant nominal I_{2n} avec un $\cos\varphi_2 = 0.8$ AR.
3. Calculer le rendement correspondant à la charge précédente.

Exercice 4

Cocher la (les) bonne (s) réponse(s).

- a- Le déphasage entre la HT et la BT est appelé indice horaire
 - b- Oui
 - c- Non

- 1- En se référant à la figure ci-contre, c'est un couplage

- a- Yd11
- b- Dy11
- c- Yz11

- 2- Yy6 signifie

- a- Enroulement primaire en Etoile
- b- Enroulement secondaire en Etoile
- c- Déphasage primaire secondaire = 6
- d- Indice horaire 6

- 3- A quel groupe appartient le couplage suivant Yy6 ?

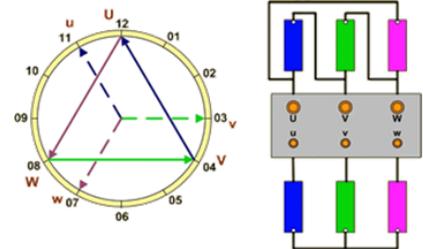
- a- Groupe I
- b- Groupe II
- c- Groupe III
- d- Groupe IV

- 4- Est-il **possible** de mettre en parallèle un transformateur Yy6 et un Dd10 ?

- d- Oui
- e- Non

- 5- Afin de répondre à une demande de puissance, il est possible de connecter 2 transformateurs en parallèle si

- a- même réseau d'alimentation
- b- indices horaires compatibles
- c- même tension secondaire
- d- tension de court-circuit similaire



7.2 Corrigé

Exercice 1

En se référant à la plaque signalétique de la figure 2.18.

1. La tension au secondaire du transformateur : 410 V
2. En position 2, la tension primaire 20 000 V
3. La tension au primaire étant de 20kV, calculez son rapport de transformation
4. Couplage du transformateur : Dyn11 (primaire triangle ; secondaire étoile avec neutre sortie ; indice horaire 11)
5. Tension de court-circuit en % : 4%
6. Courant nominal au primaire : 2.89 A
7. Courant nominal au secondaire : 140.8 A

Exercice 2

Un transformateur D/yn a un rapport de nombres de spires $mc=N_2/N_1 = 0.044$. La tension primaire $U_1 = 5$ kV.

1. La tension aux bornes d'un enroulement secondaire : $V_2 = mc * V_1$
 où V_1 désigne la tension aux bornes d'un enroulement primaire. Le couplage primaire étant D, alors on a : $V_1 = U_1$.
 D'où : $V_2 = 0.044 * 5000 = 220$ V
 Le secondaire étant couplé en étoile, on trouve entre phase la tension :
 $U_2 = \sqrt{3} * V_2 = 380$ V
2. Entre les courants des enroulements on a la relation suivante : $J_1 = mc * J_2$
 Le courant dans l'enroulement primaire est donc : $J_1 = mc * 100 = 4.4$ A
 Le courant de ligne résultant d'enroulements couplés en D est : $I_1 = \sqrt{3} * J_1 = 7.6$ A

Exercice 3

1. Déterminer les paramètres m , R_f , X_μ , R_s , X_s du dipôle de Thévenin correspondant.

- $m = \frac{V_{a0}}{V_A} = \frac{\frac{U_{20}}{\sqrt{3}}}{\frac{U_{1n}}{\sqrt{3}}} = \frac{U_{20}}{U_{1n}} = 16.67$
- $R_f = \frac{V_A^2}{\frac{P_0}{3}} = \frac{U_{1n}^2}{P_0} = 90.75 k\Omega ; P_0 \approx P_f$
- $X_\mu = \frac{V_A^2}{\frac{Q_0}{3}} = \frac{U_{1n}^2}{Q_0} = \frac{U_{1n}^2}{\sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2}} = 24.67 k\Omega$
- $R_S = \frac{\frac{P_{1cc}}{3}}{I_{acc}^2} = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2} = 3.04 \Omega$
- $Z_S = \frac{mV_{Acc}}{I_{acc}} = \frac{mU_{1cc}}{\sqrt{3} I_{2cc}} = 16 \Omega$

- $X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_S^2} = 15.7 \Omega$
- 2. Tension aux bornes d'une charge absorbant le courant nominal I_{2n} avec un $\cos\varphi_2 = 0.8$ AR.

$$\Delta U_2 = (R_S \cos\varphi_2 + X_S \sin\varphi_2) I_2$$

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2$$

$$U_2 = 10.35 \text{ kV}$$

- 3. Le rendement correspondant à I_{2n} avec un $\cos\varphi_2 = 0.8$ AR.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_0 + P_{jn}}{P_{2n}}} = \frac{1}{1 + \frac{P_0 + R_S I_{2n}^2}{\sqrt{3} P U_2 I_{2n} \cos\varphi_2}} = 0.972$$

Exercice 4

Cocher la (les) bonne (s) réponse(s).

- 1- Le déphasage entre la HT et la BT est appelé indice horaire

a- Oui

b- Non

- 2- En se référant à la figure ci-contre, c'est un couplage

a- Yd11

b- Dy11

c- Yz11

- 3- Yy6 signifie

a- Enroulement primaire en Etoile

b- Enroulement secondaire en Etoile

c- Déphasage primaire secondaire = 6

d- Indice horaire 6

- 4- A quel groupe appartient le couplage suivant Yy6 ?

a- Groupe I

b- Groupe II

c- Groupe III

d- Groupe IV

- 5- Est-il **possible** de mettre en parallèle un transformateur Yy6 et un Dd10 ?

a- Oui

b- Non

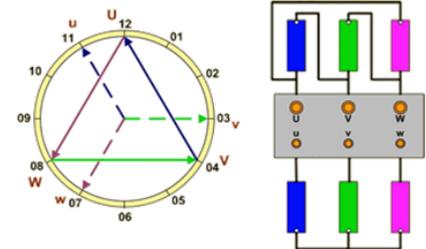
- 6- Afin de répondre à une demande de puissance, il est possible de connecter 2 transformateurs en parallèle si

a- même réseau d'alimentation

b- indices horaires compatibles

c- même tension secondaire

d- tension de court-circuit similaire



Vidéos learning

Couplage en parallèle

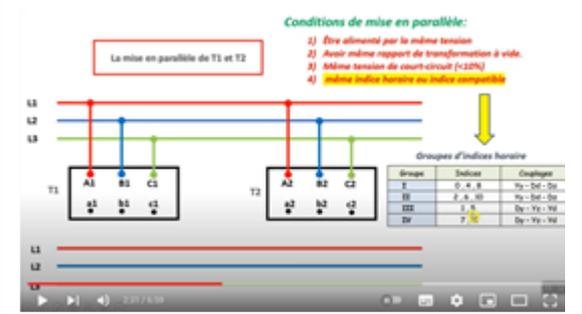
V3



Conditions de mise en parallèle:

- 1) Être alimenté par la même tension
- 2) Avoir même rapport de transformation à vide.
- 3) Même tension de court-circuit ($\pm 10\%$)
- 4) **Même indice horaire ou même groupement**

La mise en parallèle de T1 et T2



| Groupe | Indices | Couplage |
|--------|---------|--|
| I | 0, 4, 8 | Y ₁ - Def - Df1 |
| II | 1, 5, 9 | Y ₂ - Def - Df2 |
| III | 2, 6 | Df ₁ - Y ₁ - Df1 |
| IV | 3, 7 | Df ₂ - Y ₂ - Df2 |



Lien hypertexte  [WWW](#) 

Chapitre III

CONSTRUCTION ET TECHNOLOGIE DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

1. Généralité

Le transformateur de puissance est un système de haute technologie cherchant l'optimisation du transfert d'énergie électrique, contraint par une minimisation des pertes et d'une maximisation de la fiabilité.

Les Minimum Efficiency Performance Standards (MEPS) poussent les constructeurs à apporter le plus grand soin à la fabrication de ces machines, car, dans un monde où l'énergie est chère, une perte de 1% sur 100 MW équivaut à la consommation de 1000 habitants. Ce faisant, leurs rendements atteignent 99% !

Les transformateurs de puissance se répartissent en 3 grandes familles :

- le transformateur triphasé est le plus courant, il comporte généralement un enroulement secondaire par phase, mais dans certains cas, il peut en posséder davantage dans le cas d'utilisations spécifiques telles que l'alimentation d'un pont redresseur dodécaphasé ;
- le transformateur monophasé utilise majoritairement dans le domaine de la traction électrique pour l'alimentation des catenaires et des convertisseurs à bord des locomotives. Mais également, lorsque des limites de gabarit et de masse s'imposent en matière de transport. Les transformateurs monophasés sont couplés pour alimenter un système triphasé ;
- **l'autotransformateur** a un rapport poids/puissance plus réduit qu'un transformateur standard. Il ne comporte qu'un enroulement par phase. Le changement de tension est réalisé par une « prise » de tension sur l'enroulement, et possède un point de raccordement commun aux deux réseaux. La totalité de l'enroulement peut jouer le rôle de primaire et la partie de l'enroulement jusqu'au point intermédiaire le rôle de secondaire. Leur principal inconvénient réside dans l'absence d'isolation galvanique, autorisant la propagation des défauts homopolaires. Ils sont utilisés pour le réglage de la tension sur de grandes amplitudes, ou pour agir sur le transfert de puissance réactive dans les réseaux maillés.

2. Partie active

2.1 Circuit magnétique

Le circuit magnétique est une partie active importante des transformateurs, qui transfère l'énergie électrique d'un circuit à l'autre. Il se présente sous la forme d'un fer laminé structure de noyau qui fournit un chemin à faible réluctance au flux magnétique produit par un enroulement excité.

Le noyau, qui canalise le flux, est constitué d'un empilage de fines bandes d'acier au silicium à cristaux orientés de 0,28 à 0,35 mm d'épaisseur, appelées tôles, qui sont électriquement séparées par une fine couche de matériau isolant. La majeure partie du flux est contenue dans le noyau.

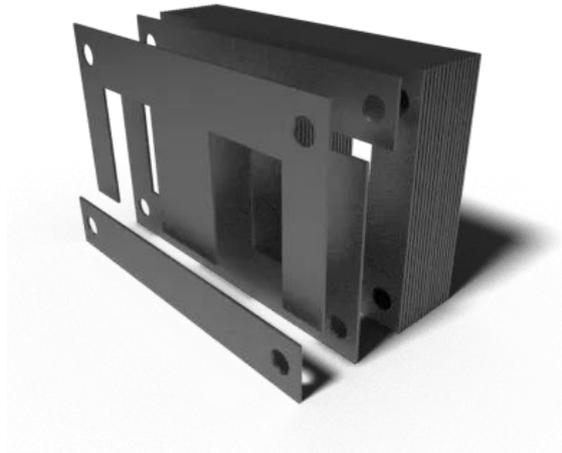


Figure 3.1. Feuilletage de tôles

Ce feuilletage de tôles isolées les unes des autres (fig. 3.1) permet de réduire la surface apparente aux lignes de champ qui les traversent. Les courants de Foucault induit dans cette fine section, y sont limités. L'utilisation d'acier traité au silicium (4 à 5%) réduit les pertes par hystérésis. Ces techniques ont toutes pour objectif de limiter l'échauffement dites pertes fer.

La densité de flux maximale de l'acier du noyau est généralement conçue aussi près que possible du coude de saturation de la courbe (B-H), en tenant compte des surexcitations et des tolérances requises. Pour les transformateurs de puissance, la densité de flux est typiquement comprise entre 1,3 et 1,8 T, le point de saturation pour l'acier magnétique étant autour de 2,03 à 2,05 T.

2.1.1 Variantes de circuit magnétique

Deux grandes familles de circuits magnétiques existent (fig. 3.2) :

- en colonnes ;
- cuirassé.

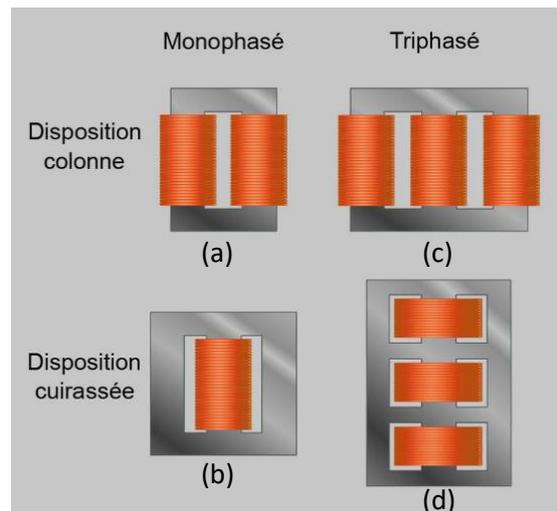


Figure 3.2. Différents types de circuit magnétique (à colonnes et cuirassé)

Dans la construction en forme en colonne, il est prévu un seul chemin pour le circuit magnétique (flux liés). Les enroulements y sont placés autour du circuit magnétique. Les parties métalliques verticales sont appelées **colonnes**, celles horizontales **culasse**. La figure 3.2-a montre un schéma d'un noyau monophasé. Pour les applications monophasées, les enroulements sont généralement divisés sur les deux branches du noyau, comme illustré. Dans les applications triphasées, les enroulements d'une phase particulière sont généralement sur la même branche de noyau, comme illustré à la figure 3.2-c. Les circuits à colonnes ont l'avantage d'être plus simple à construire et à refroidir ainsi qu'à réparer

Les circuits cuirassés entourent au contraire les enroulements, ils permettent de réaliser des transformateurs avec une faible impédance de court-circuit. En outre, à cause de la meilleure protection magnétique produit par le montage cuirassé, celui-ci est utilisé dans le cas où la tension est faible et le courant très élevé, typiquement dans les fours à arc électrique. Ceux à colonnes sont toutefois largement majoritaires dans le monde.

Pour les transformateurs triphasés la construction plus courante est celle à 3 colonnes (fig. 3.3-a). Les culasses et les colonnes ont alors même section. Si dans un réseau équilibré la somme des trois tensions est nulle et par conséquent la somme des trois flux dans le transformateur l'est aussi, en cas de défaut non équilibré par exemple ou quand le transformateur n'a pas une charge équilibrée sur ses 3 phases un flux homopolaire peut apparaître. Dans un transformateur à 3 colonnes ce flux doit trouver un chemin de retour hors des enroulements de culasse à culasse, il y a donc formation d'un flux de fuite externe important. Une solution consiste à placer aux côtés des 3 colonnes bobinées 2 autres colonnes non bobinée servant de chemin de retour pour le flux (fig. 3.3 – b). Dans ce cas, la section des culasses est la moitié de celle des colonnes, le flux se divisant en deux parties égale en sortant des colonnes. Cela permet de réduire la hauteur totale du circuit magnétique, pour cette raison cette solution est très répandue pour les gros transformateurs.

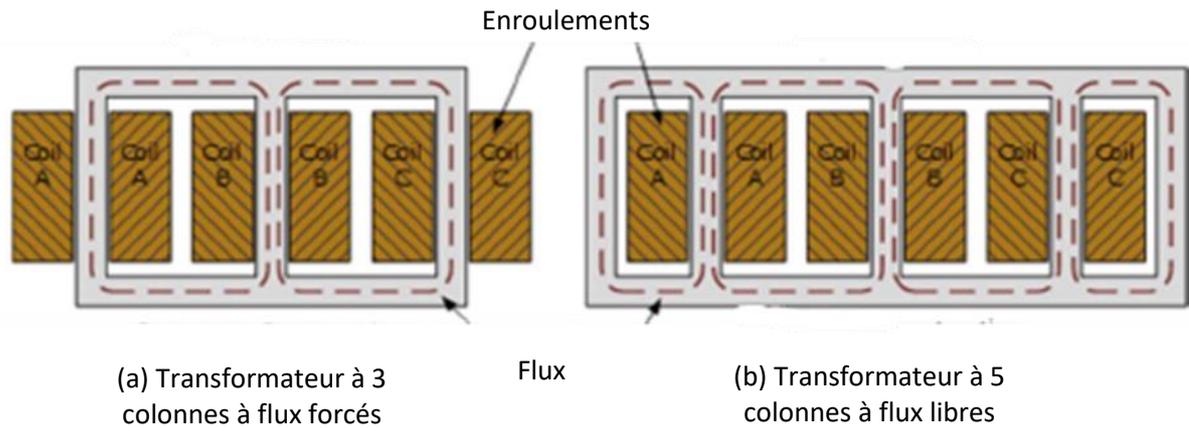


Figure 3.3. Variantes de circuit magnétique d'un transformateur triphasé

2.1.2 Section du circuit magnétique

La section transversale du noyau peut être circulaire ou rectangulaire (fig. 3.4), avec des noyaux circulaires généralement appelée construction cruciforme. Les noyaux rectangulaires sont utilisés pour les petites puissances et comme transformateurs auxiliaires utilisés dans un transformateur de puissance.

Les noyaux rectangulaires utilisent une seule largeur de bande d'acier, tandis que les noyaux circulaires utilisent une combinaison de différentes largeurs de bande pour se rapprocher d'une section transversale circulaire.

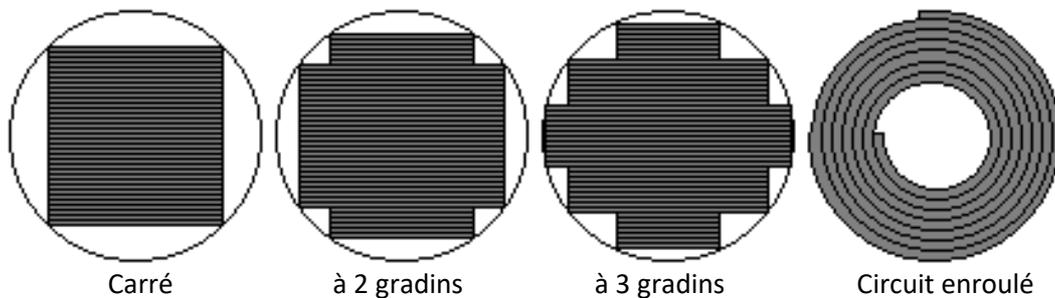


Figure 3.4. Section du noyau

L'optimisation du circuit magnétique passe aussi par la réduction du courant magnétisant i_0 . Le plus grand soin est apporté à l'assemblage des tôles de manière à faciliter au mieux la pénétration et la circulation des lignes de champ, qui contribueront à limiter le flux de fuite, et la reluctance équivalente.

Pour ce faire, il faut à tout prix minimiser les entrefers. C'est pourquoi, la conception des colonnes et des culasses sont réalisées en gradin, afin d'épouser au mieux la section circulaire des enroulements. Ce montage a également l'avantage d'assurer une meilleure tenue mécanique des bobines grâce à une réduction des mouvements radiaux engendrés par les forces électromagnétiques. Un profilage biseauté des assemblages de tôles permet de canaliser et faciliter la circulation des lignes de champ.

2.1.3 Jonction entre tôles

Le problème est de raccorder les noyaux sur les culasses, au moyen d'un joint aussi simple que possible, avec des pertes minimales.

Le joint plan (fig. 3.5-a) facilite le montage et le démontage des bobinages. Les parties des noyaux et culasse à assembler sont usinées. Un joint isolant est nécessaire pour éviter les courts-circuits magnétiques.

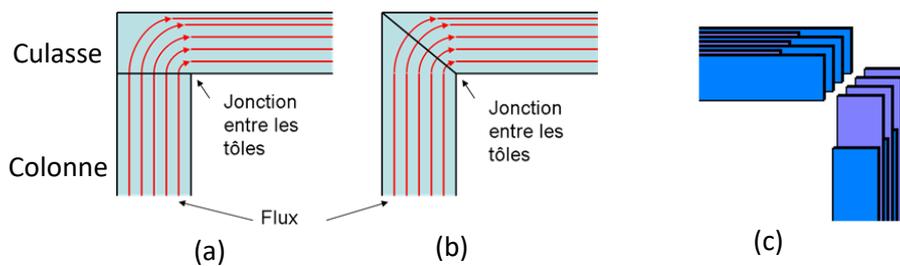


Figure 3.5. Jonction entre tôles

Le joint enchevêtré est la solution classique (fig3.5-c). Le montage est fait tôle par tôle. Les qualités magnétiques du joint sont meilleures.

Le noyau formant un rectangle le flux doit « tourner » dans ces zones. Si les tôles sont coupées en faisant des angles droits, le flux rentre dans une zone de forte réluctance à la transition, source de contraintes et de pertes de flux. Pour éviter cela la première mesure consiste à couper les tôles de manière oblique : à 45°, le flux passe alors par cette zone de reluctance plus élevée mais cela reste dans un ordre de grandeur raisonnable (fig3.5-b).

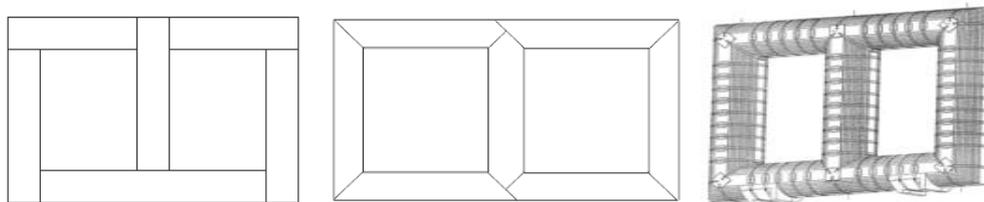


Figure 3.6. Assemblage des colonnes et des culasses

Pour réduire les bruits du transformateur, les tôles doivent être serrées ensemble et les trous de perforation doivent être évités autant que possible pour minimiser les pertes de fer par flux croisé (fig. 3.6). L'entrefer à la jonction des branches et des culasses doit être réduit autant que possible pour permettre un maximum de chemins conducteurs lisses pour le courant magnétisant.

2.2 Enroulements

Un enroulement est l'ensemble des spires formant un circuit associé à l'une des tensions pour lesquelles le transformateur a été établi. Pour plus de clarté, il convient d'employer les termes enroulements haute tension (HT ou HV), moyenne tension (MT) et basse tension (BT ou LV) qui ne prêtent pas à confusion étant classés en fonction de leur niveau de tension.

Les enroulements sont constitués des conducteurs de courant enroulés autour des sections du noyau. Ils doivent être correctement isolés, soutenus et refroidis pour résister aux conditions de fonctionnement.

Le cuivre et l'aluminium sont les principaux matériaux utilisés comme conducteurs dans les enroulements des transformateurs de puissance. Bien que le cuivre soit le plus utilisé. Le profil des conducteurs dépend de la densité du courant les traversants :

- de section circulaire (jusqu'à 5 mm²) ;
- sous forme de méplat regroupant plusieurs fils jointifs reliés aux extrémités, et sous forme de barreau de cuivre plein.

Selon l'emplacement des enroulements sur les colonnes on distingue deux types de bobinage.

- **Bobinage concentrique (en tonneau)**

Les enroulements de type concentrique (fig. 3.7) sont utilisés dans le type de transformateur à colonne. L'enroulement basse tension est placés près du noyau. Cependant, pour réduire la réactance de fuite, les enroulements peuvent être entrelacés. L'enroulement pour le type de noyau dépend de nombreux facteurs tels que l'intensité nominale, la capacité de résistance aux courts-circuits, la limite d'élévation de température, l'impédance, la surtension, les installations de transport, etc.

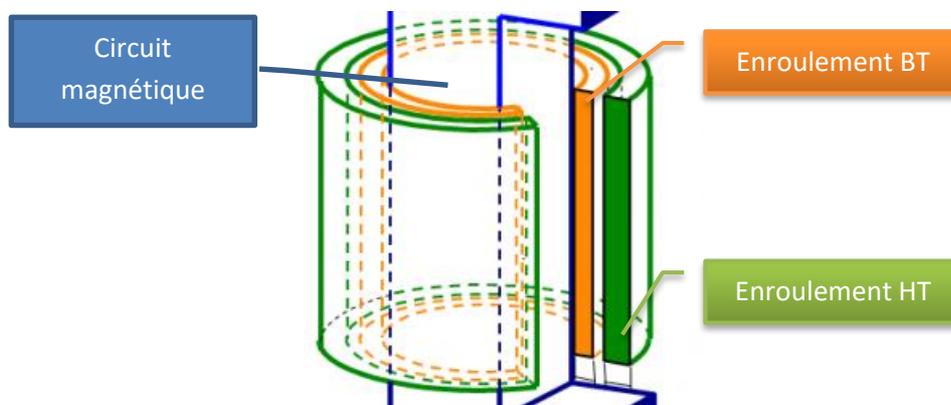


Figure 3.7. Enroulements concentriques

Il existe le bobinage concentrique double, dont la moitié du bobinage basse tension est enroulée sur le noyau et isolée, puis on enroule le bobinage haut tension et on isole et enfin, on termine par la deuxième moitié du bobinage basse tension. Autrement dit, le bobinage haut tension se trouve entre les deux moitiés basses tensions.

- Bobinage alterné en galettes

Les bobinages haute et basse tension sont fractionnés et constitués par des couronnes ou **galettes** (fig. 3.8) qui sont enfilées alternativement sur les noyaux. Parfois pour les transformateurs à forte intensité, les bobinages sont calés à l'aide de ressorts permettant de légers déplacements dans le cas de fortes actions électrodynamiques

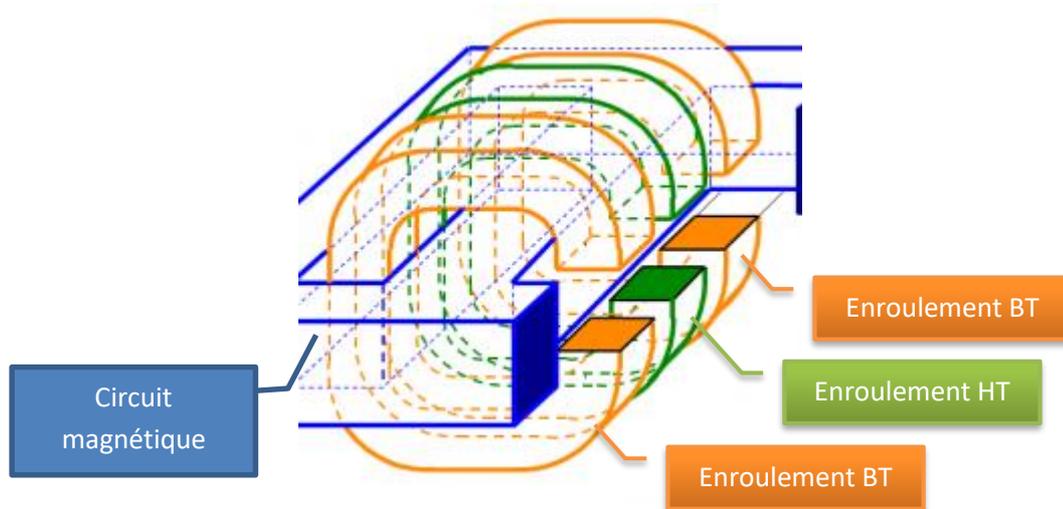


Figure 3.8. Enroulement à Galettes

L'isolation entre couches et entre enroulements est assurée grâce à de la bande polyester et du papier imprégné de résine époxy. Il confère à la structure du bobinage une meilleure rigidité diélectrique ainsi qu'une plus grande tenue mécanique face aux efforts électrodynamiques présents.

2.3 Régulateur de tension

Presque tous les transformateurs de puissance permettent de réguler la tension ; d'ajuster leur rapport de transformation en ajoutant, ou retranchant, quelques spires de réglage en série avec les spires de l'enroulement haute tension, à l'aide d'un système mécanique : le régleur.

Cet ajustement peut être réalisé en charge, comme c'est souvent le cas sur de gros appareils, ou hors charge. Les régulateurs en charge sont plus complexes que les commutateurs hors tension, mais ils permettent de stabiliser le réseau en maintenant une tension constante.

Les régulateurs en charge sont des appareils électromécaniques particulièrement sollicités. Ils font l'objet d'une maintenance attentive car leur moindre défaillance peut endommager sérieusement le transformateur.

Sur les transformateurs de forte puissance, ce régleur (fig. 3.9 et fig. 3.10) est composé de deux parties mécaniques distinctes travaillant ensemble :

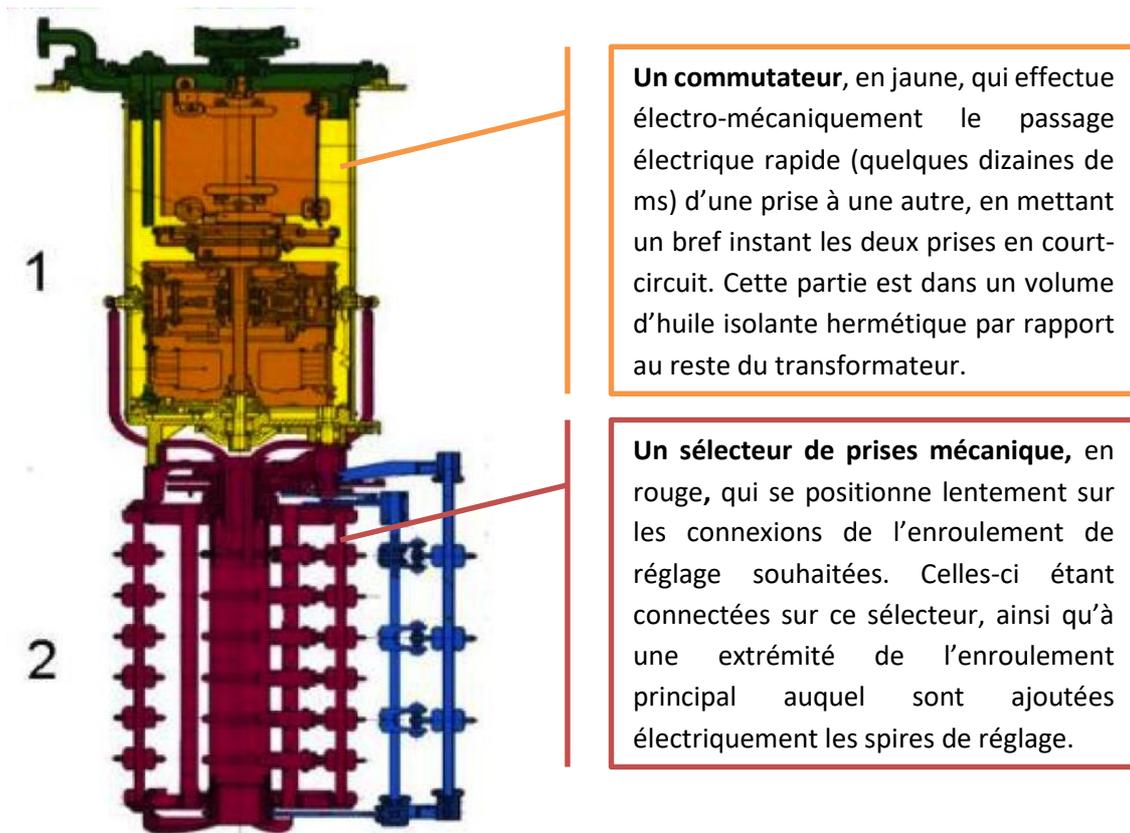


Figure 3.9. Régleur en charge (changeur de prises) MR Type M

L'ensemble commutateur et sélecteur est entraîné par un moteur externe dans une armoire de commande électrique dédiée au régleur en charge.

Les régleurs en charge sont la première cause de défaillance importante sur les transformateurs de puissance. Cet appareil court-circuitant et ouvrant le courant de charge en quelques dizaines de millisecondes, par une action mécanique, tout défaut sur ce système engendre rapidement des problèmes importants. De plus, il doit tenir les contraintes électriques et mécaniques pendant plusieurs centaines de milliers de manœuvres avant une révision du constructeur systématique. La norme internationale de référence sur les régleurs en charge neufs est (IEC 60214-1, 2003).

La figure 3.10 montre un enroulements triphasé sorti de sa cuve, à gauche des trois enroulements on peut voir le changeur de prises.

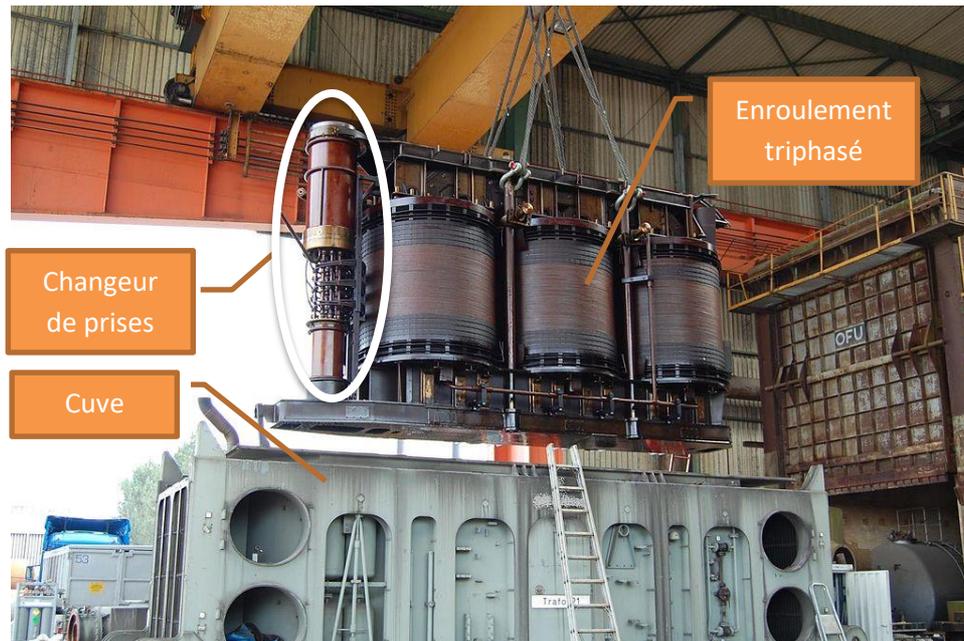


Figure 3.10. Changeur de prises sur transformateur triphasé

2.4 La connectique

La connexion aux réseaux électriques des parties actives du transformateur (fig. 3.11), est réalisée par les traversées (bushings).

Seuls liens avec l'environnement extérieur, ces éléments sont soumis à d'importantes contraintes.

- **Mécaniques** : leur enveloppe en céramique ou polymère doit résister aux efforts de traction issus des câbles de la ligne ;
- **Thermiques** : en raison des courants élevés circulant dans l'âme centrale et des difficultés d'élimination de la chaleur à travers le corps isolant. Une instabilité thermique peut rapidement dégrader la qualité diélectrique des matériaux isolants.
- **Électriques** : la tension phase-terre, est à l'origine d'un intense champ électrique radial, établi tout le long du conducteur central, et l'embase de fixation. La longueur de l'isolateur et son profil crénelé, permet d'accroître l'éloignement du conducteur d'alimentation en limitant le champ électrique longitudinale, dans le but d'éviter tout amorçage par l'extérieur en cas de surtension (foudre par ex.).

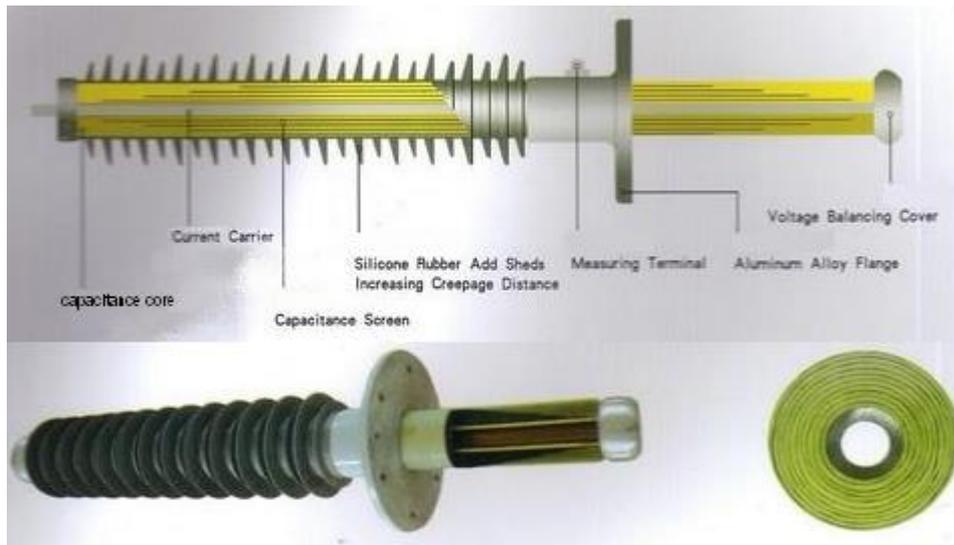


Figure 3.11. Traversée haute tension [source ABB]

A titre d'exemple dimensionnelle une traversée 800 kV isolant en papier imprègne d'huile, longueur hors-tout 10m, poids 3673 kg.

3. Isolation

L'isolation diélectrique, qu'elle soit solide ou liquide, doit permettre au transformateur de résister à la fois à la tension alternative en régime permanent et aux surtensions transitoires sans décharge électrique. Pour ce faire, elle doit homogénéiser le champ électrique dans le transformateur.

L'isolation solide est constituée principalement de cellulose, celle liquide est normalement constituée d'huile.

On distingue deux catégories de transformateurs : les transformateurs secs et les transformateurs immergés. Le choix s'effectue sur des critères de puissance, mais également sur des critères liés à la sécurité des personnes, à l'incendie et à l'environnement.

3.1 Transformateur à sec

Un transformateur de type sec est un « transformateur pour lequel le circuit magnétique et les enroulements ne sont pas immergés dans un liquide isolant ». Concrètement, ses enroulements sont isolés à l'aide de gaz ou d'isolation solide, comme du vernis, du papier ou de la résine. Cela ne change pas fondamentalement la façon dont sont conçus ces transformateurs en comparaison de ceux immergés dans l'huile.

Les transformateurs secs, dont les puissances typiques vont jusqu'à 2500kVA, sont principalement destinés aux postes de transformation intérieur, dont l'environnement et le

risque incendie ne tolère pas la présence de liquides inflammables et polluants (cas par exemple des immeubles de grandes hauteurs).

Ils offrent l'avantage d'une simplification de l'infrastructure du bâtiment.

L'air sert de réfrigérant et circule à travers les parties actives. On parle d'un système de refroidissement Air-Air (AA) par convection naturelle ; ou Air-Force (AF) la convection est forcée à l'aide de ventilateurs d'extraction.

L'air étant un mauvais fluide caloporteur, ces transformateurs sont surdimensionnés par rapport à leur puissance assignée. De manière à limiter les pertes Joules, leur rapport volume/puissance est supérieur aux transformateurs immergés, ce qui réduit leur gamme à quelques MVA.

Leur durée de vie est fortement liée à la qualité de l'air. En effet, l'hygrométrie, la présence de produits corrosifs, la poussière, va altérer progressivement l'isolement général de la machine, surtout au niveau de la connectique. L'exploitation de telle machine nécessite donc un nettoyage soigné et régulier (NF EN 60076-11,2004).



Figure 3.12. Transformateurs Siemens à sec en résine moulée, GEAFOLE, en coffret IP 20/40

3.2 Transformateur immergé

Les transformateurs immergés sont préférés lorsque l'on sort des critères de sécurité imposés : ils sont moins encombrants, nécessitent moins d'entretien, et sont disponibles sur des gammes allant d'une centaine de KVA à plusieurs GVA. Les parties actives baignent dans de l'huile minérale hautement raffinée, ou végétale (*biodégradable à 99% en 43 jours, type Végéta Schneider*), et y circule par convection naturelle.

L'huile se réchauffe au contact des enroulements et du circuit magnétique, et se refroidit à travers les ailettes situées sur la cuve servant d'échangeur thermique. Pour les machines de

plusieurs MVA, la dissipation thermique est accélérée grâce à des ventilateurs disposés autour de la cuve.



Figure 3.13. Coupe transversale d'un transformateur de distribution triphasé TUMETIC de distribution,

L'huile possède de très bonnes propriétés diélectriques, thermiques, et limite toute oxydation et pollution des parties actives. Néanmoins, ces effets thermochimiques provoquent la lente dégradation de l'appareil.

En permanence en contact avec les enroulements et le circuit magnétique, une analyse de sa composition permet de vérifier ses propriétés d'une part, mais également de détecter la présence de particules issues des isolants celluloseux, de gaz dissous, ou encore d'éléments carbonés révélateurs de défaillances.

Ainsi, l'état général de sante des machines immergées s'obtient par une « prise d'huile ». Cette analyse simple a effectué leur donne un avantage stratégique majeur, inexistant pour les transformateurs secs, qui nécessite de faite, la mise en place d'autres moyens de suivi.

3.3 L'enveloppe

Les transformateurs secs sont protégés par éloignement grâce à une enveloppe en tôle d'acier, mettant les parties sous tension hors de portée. Elle est perforée, les d'ouïes de ventilation permettant une circulation d'air à travers la machine, parfois complète d'un système de ventilation pour en augmenter le débit. Leur protection se limite à 3 sondes de température de type PT100 placées dans les parties actives à 2 seuils de détection. Un premier seuil d'alarme, un second suivi d'une action d'ouverture du disjoncteur primaire.

Les transformateurs immergés, sont logés à l'intérieur d'une cuve d'acier mécano-soudée étanche, capable d'accueillir la charge d'huile.

Les ailettes de réfrigération sont moulées dans la cuve. De structure souple, elle se déforme en fonction de la température de l'ensemble. Cette élasticité est particulièrement nécessaire pour les transformateurs dit ERT (Étanche à Remplissage Total), dont la gamme de puissance s'étend jusqu'à 10MVA.

4. Refroidissement des transformateurs

Le système de refroidissement d'un transformateur a pour but de maintenir les températures des enroulements et de l'isolant (huile par exemple) à des niveaux acceptables.

La figure 3.14 montre au premier plan, le banc de radiateur avec des ventilateurs dessous



Figure3.14. Système de refroidissement

4.1 Différentes techniques de refroidissement des transformateurs

Pour accélérer le refroidissement, différentes **méthodes de refroidissement des transformateurs** sont utilisées en fonction de leur taille et de leurs valeurs nominales.

4.1.1 Refroidissement naturel

Il s'agit du **système de refroidissement de transformateur** le plus simple. La forme complète d'ONAN est "Oil Natural Air Natural". Ici, le flux conventionnel naturel d'huile chaude est utilisé pour le refroidissement. Dans la circulation d'huile par convection, l'huile chaude s'écoule vers la partie supérieure de la cuve du transformateur et la place vacante est occupée par de l'huile froide. Cette huile chaude qui vient à la face supérieure, va dissiper la chaleur dans l'atmosphère par conduction naturelle, convection et rayonnement dans l'air et va devenir froide. De cette façon, l'huile dans le réservoir du transformateur circule en permanence lorsque le transformateur est mis en charge (fig. 3.15).

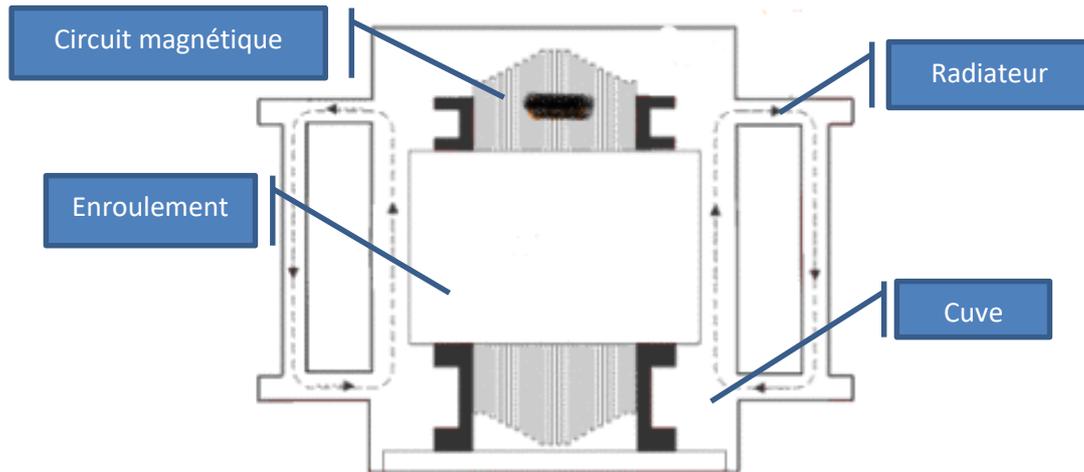


Figure 3.15. Refroidissement ONAN

4.1.2 Refroidissement ONAF du Transformateur

La dissipation thermique peut évidemment être augmentée si la surface de dissipation est augmentée, mais elle peut être rendue encore plus rapide en appliquant un flux d'air forcé sur cette surface de dissipation. Des ventilateurs soufflant de l'air sur la surface de refroidissement sont utilisés (fig. 3.16). L'air forcé dissipe la chaleur de la surface du radiateur et fournit un meilleur refroidissement que l'air naturel. La forme complète de l'ONAF est "Oil Natural Air Forced".

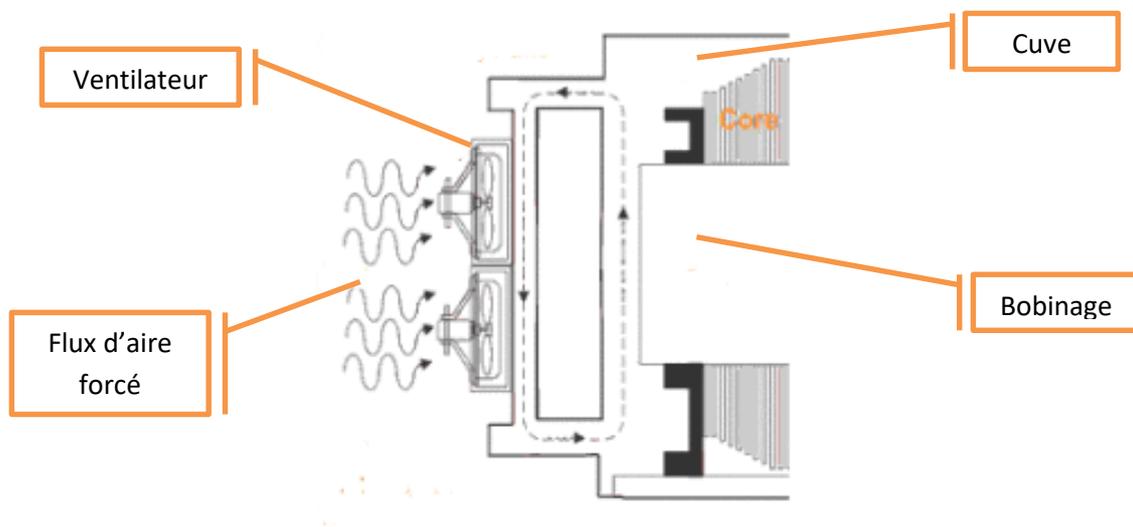


Figure 3.16. Refroidissement forcé ONAF

4.1.3 Refroidissement OFAF du transformateur

Dans le système de refroidissement naturel à air pulsé d'huile du transformateur, la dissipation thermique est accélérée en utilisant de l'air pulsé sur la surface de dissipation, mais la circulation de l'huile chaude dans le réservoir du transformateur est un flux de convection naturelle.

Le taux de dissipation thermique peut être encore augmenté si cette circulation d'huile est accélérée en appliquant une certaine force. Dans le système de refroidissement OFAF, l'huile est forcée de circuler dans la boucle fermée du réservoir du transformateur au moyen de pompes à huile. OFAF (fig. 3.17) signifie "Oil Forced Air Forced" méthodes de refroidissement du transformateur. Le principal avantage de ce système est qu'il s'agit d'un système compact et pour une même capacité de refroidissement, l'OFAF occupe beaucoup moins d'espace que les systèmes de refroidissement de deux transformateurs. En fait, dans le système de refroidissement naturel à l'huile, la chaleur provenant de la partie conductrice du transformateur est déplacée de sa position, à un rythme plus lent en raison du flux d'huile par convection, mais dans le système de refroidissement forcé à l'huile, la chaleur est déplacée de son origine dès qu'elle arrive dans l'huile, donc le taux de refroidissement devient plus rapide.

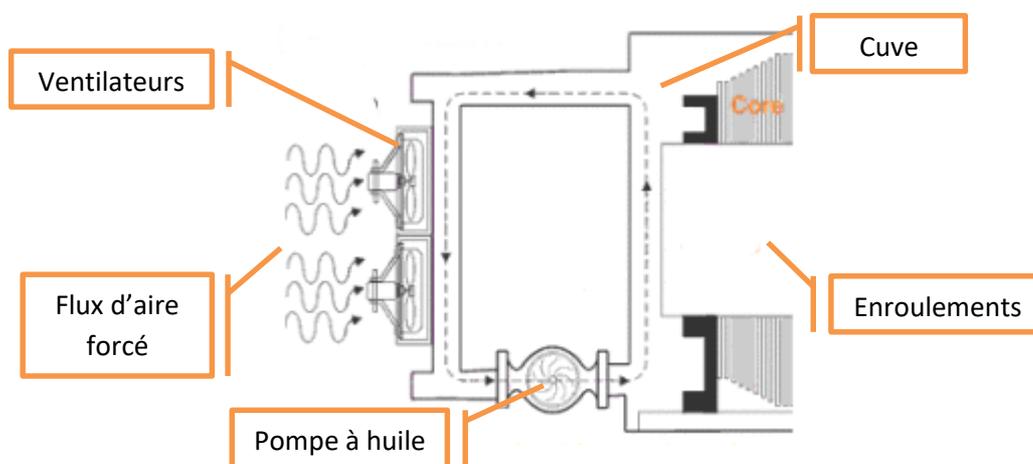


Figure 1.17. Refroidissement forcé OFAF

4.1.4 Refroidissement OFWF du transformateur

Nous savons que la température ambiante de l'eau est bien inférieure à celle de l'air atmosphérique dans les mêmes conditions météorologiques. Ainsi, l'eau peut être utilisée comme meilleur échangeur de chaleur que l'air. Dans le système de refroidissement OFWF **du transformateur**, l'huile chaude est envoyée à un échangeur de chaleur huile-eau au moyen d'une pompe à huile et là (fig. 3.18), l'huile est refroidie en appliquant des semeurs d'eau froide sur les conduites d'huile de l'échangeur de chaleur. OFWF signifie "Oil Forced Water Forced" refroidissement dans le transformateur.

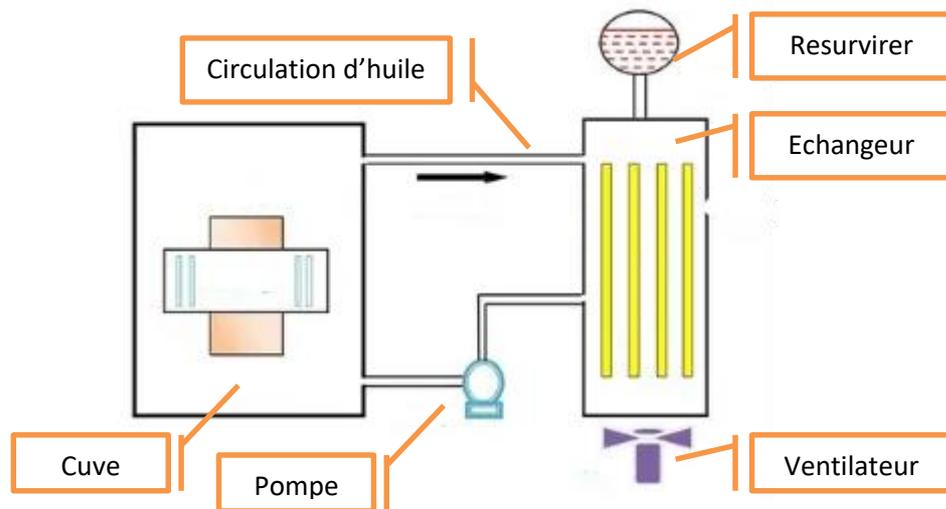


Figure 3.18. Refroidissement OFWF du transformateur

4.1.5 Refroidissement ODAF du transformateur

L'ODAF ou le refroidissement forcé par air forcé du transformateur peut être considéré comme la version améliorée de l'OFAF. Ici, circulation forcée d'huile dirigée pour s'écouler à travers des chemins prédéterminés dans l'enroulement du transformateur. Des canaux permettant la circulation de l'huile sont aménagés dans le noyau et les enroulements afin de permettre l'évacuation de leur chaleur. L'huile froide entrant dans le réservoir du transformateur depuis le refroidisseur ou le radiateur passe à travers l'enroulement où des espaces pour l'écoulement d'huile ou des chemins d'écoulement d'huile prédéterminés entre le conducteur isolé sont prévus pour assurer un taux de transfert de chaleur plus rapide. L'ODAF ou le refroidissement forcé par air dirigé par l'huile du transformateur est généralement utilisé dans les transformateurs à très haute puissance.

4.1.6 Refroidissement ODWF du transformateur

L'ODWF ou le refroidissement forcé par eau dirigée par l'huile du transformateur est similaire à l'ODAF, la seule différence est qu'ici, l'huile chaude est refroidie dans un refroidisseur au moyen d'eau forcée au lieu d'air. Ces deux **méthodes de refroidissement du transformateur** sont appelées refroidissement forcé à l'huile du transformateur.

4.2 Symboles du mode de refroidissement

Un système de refroidissement est caractérisé par un code de quatre lettres.

- La première indique le fluide de refroidissement INTERNE en contact avec les enroulements ; ainsi **O** correspond à l'huile (Oil en Anglais)
- La seconde, le mode de circulation de ce fluide ; deux modes sont possibles
 - **N** pour ventilation Naturelle (Natural)
 - **F** pour ventilation Forcée (Forced)

- La troisième, le fluide de refroidissement EXTERNE ; ainsi **A** correspond à Air
- La quatrième, le mode de circulation de cet agent extérieur, de type **N** ou **F**.

Seuls les transformateurs de type sec pour lesquels les parties actives sont directement refroidies par l'air extérieur sont définis par deux lettres.

Dans le tableau sont indiqués les désignations des différentes lettres qui forment la symbolisation des transformateurs.

| Agent de refroidissement | Symbole | Circulation | Symbole |
|--|---------|---|---------|
| Huile minérale | O | Naturelle | N |
| Diélectrique ininflammable | L | Forcée et dirigée dans les enroulements | D |
| Liquide isolant ayant un point de feu > 300 °C | K | Forcée | F |
| Gaz | G | | |
| Eau | W | | |
| Air | A | | |
| Isolant solide | S | | |

4.3 Exemple d'installation

Le poste de la figure 19 est équipé d'un système aéroréfrigérant.

Les enroulements du transformateur sont immergés dans de l'huile, ce liquide dit diélectrique joue un double rôle :

- L'isolement des enroulements et des éléments qui composent le transformateur.
- L'huile assure le refroidissement du transformateur.

Sans ce système de réfrigération, l'huile chauffe et augmente la pression à l'intérieur du transformateur.

Un système de ventilation couplé à un radiateur est donc mis en place pour maintenir une température constante à l'intérieur du transformateur.

Une pompe fait circuler l'huile dans le transformateur et dans le radiateur (circuit fermé).

Le radiateur placé au 2^e étage du poste est connecté au circuit d'huile du transformateur.

Les ventilateurs, situés au 2^e étage également, aspirent l'air de l'extérieur via des bouches d'aération placées en façade du bâtiment.

L'air ainsi aspiré traverse le radiateur composé de cylindres munis d'ailettes dans lesquels circulent l'huile et permet de refroidir les cylindres ainsi que l'huile.

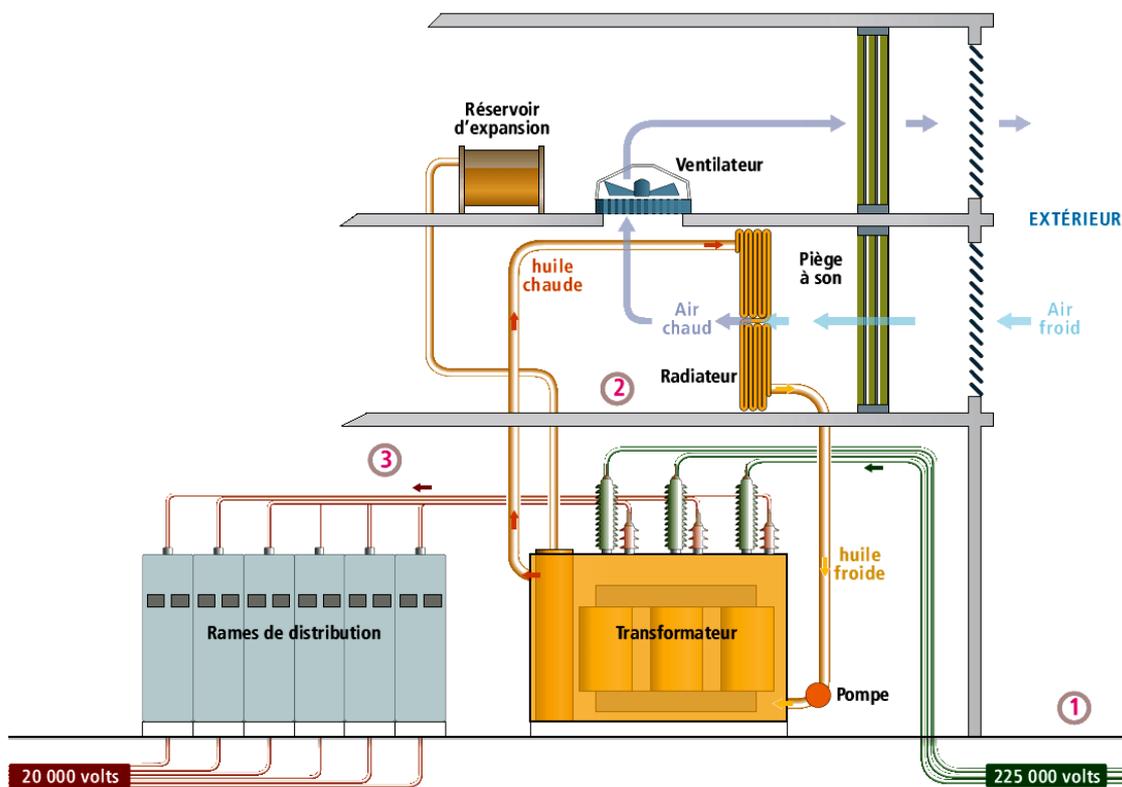


Figure 3.19 Poste 225 kV / 20 kV

5. Equipements auxiliaires

Un transformateur dispose de nombreux accessoires. Certains sont indispensables comme le dispositif permettant la dilatation de l'huile (le conservateur) du transformateur à huile ou le contrôle de température du transformateur à sec, d'autres ne le sont pas comme le changeur de prises. Ceux présentés ici correspondent à un transformateur de puissance « classique ».

Sur le schéma de la figure 20 sont représentés les accessoires équipant un transformateur à huile classique.

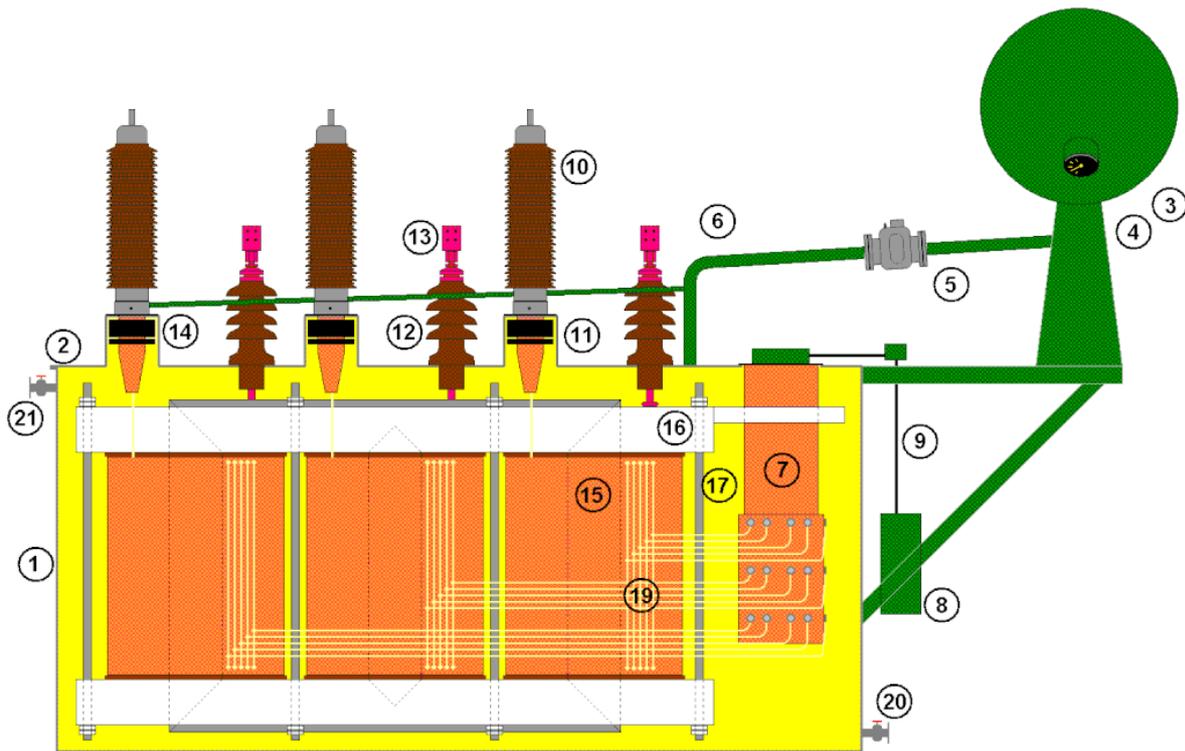


Figure 3.20. Accessoires transformateur à huile

1. Cuve
2. Couvercle
3. Conservateur
4. Indicateur de niveau d'huile
5. Relais Buchholz
6. Tuyau d'huile
7. Changeur de prises
8. Moteur électrique du changeur de prises
9. Transmission mécanique du changeur de prises
10. Traversée du primaire, avec connexion à son extrémité
11. Dôme avec transformateurs de courant à l'intérieur
12. Traversée du secondaire
13. Connexion du secondaire avec l'extérieur
14. Dôme avec transformateurs de courant à l'intérieur
15. Enroulements
16. Noyau magnétique
17. Élément mécanique maintenant le noyau magnétique et les enroulements ensemble exerçant une force de compression
18. (non représenté)
19. Connexion du changeur de prises aux enroulements
20. Robinet d'huile
21. Robinet d'air

D'autres accessoires peuvent exister dans un transformateur et qui ne figurent pas dans cette illustration.

5.1 Conservateur

Il s'agit d'une cuve cylindrique montée sur une structure de support sur le couvercle de la cuve principale du transformateur. La fonction principale du réservoir de conservateur du transformateur est de fournir un espace adéquat pour l'expansion de l'huile à l'intérieur du transformateur.

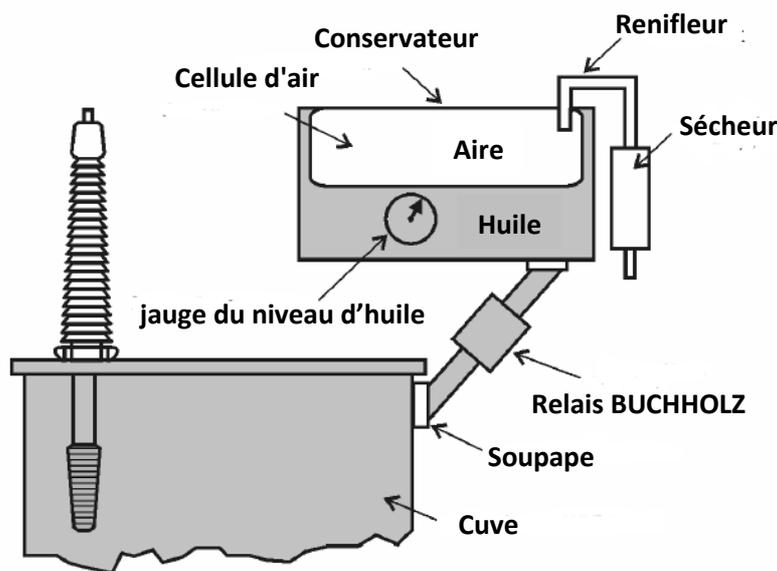


Figure 3.21. Conservateur avec cellule d'air.

L'air entre et sort dans la cellule d'air lorsque le niveau d'huile dans le réservoir principal varie avec la température. L'air transite via un sécheur d'air de type dessiccateur dont le dessiccateur doit être remplacé périodiquement. Les principaux éléments du système sont le réservoir d'expansion, la vessie ou le diaphragme (cellule d'air), le renifleur, les soupapes d'aération, la jauge de niveau de liquide et le commutateur d'alarme. Les soupapes d'aération sont utilisées pour évacuer l'air du système lorsque l'unité est remplie d'huile.

5.2 Relai Buchholz

Le relais Buchholz (fig. 2.22) est un dispositif de sécurité monté sur les transformateurs de puissance et réacteurs remplis d'huile, équipés d'un réservoir d'huile aérien externe appelé "conservateur". Les relais Buchholz sont utilisés comme dispositif de protection, car ils sont sensibles aux effets de la défaillance diélectrique qui peut se produire à l'intérieur de l'équipement qu'ils protègent. Les relais Buchholz est un type de relais de détection de gaz.

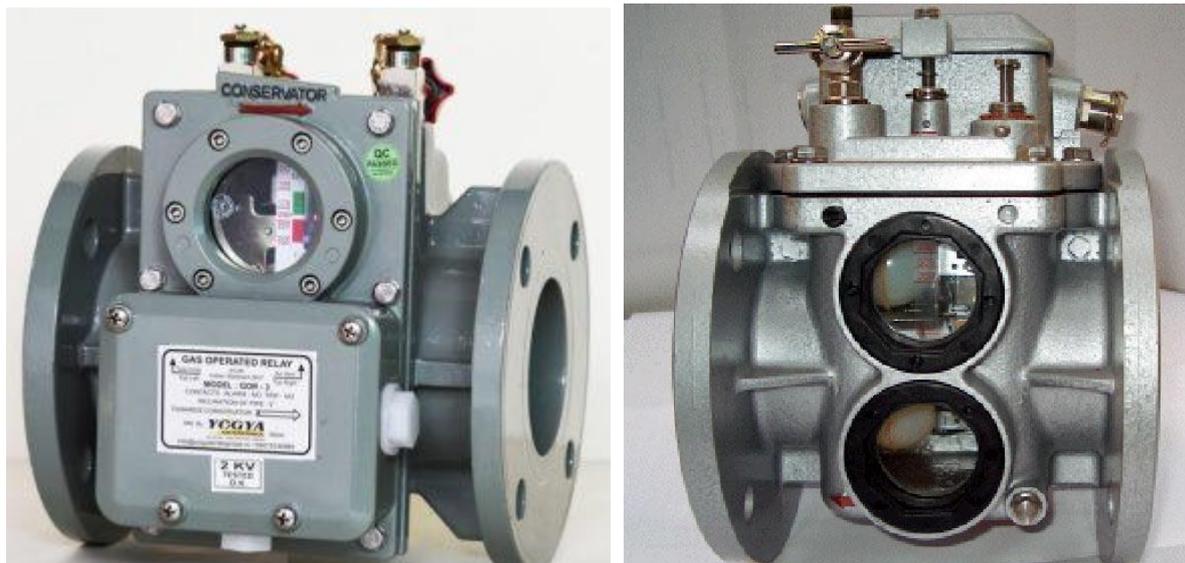


Figure 3.22. Relais Buchholz

Le relais Buchholz est installé sur le tuyau de liaison entre le réservoir principal et le réservoir du conservateur (fig. 2.21). Il comporte principalement deux éléments. L'élément supérieur qui est constitué d'un flotteur. Le flotteur est fixé de telle sorte qu'il peut monter et descendre en fonction du niveau d'huile dans le conteneur du relais Buchholz. Un interrupteur à mercure est fixé sur le flotteur. L'alignement du commutateur à mercure dépend donc de la position du flotteur.

Chaque fois qu'il y aura un défaut interne mineur dans le transformateur, tel qu'un défaut d'isolation entre les spires, une panne du noyau du transformateur, un échauffement du noyau, l'huile isolante du transformateur sera décomposée en différents gaz d'hydrocarbures, CO₂ et CO. Les gaz produits en raison de la décomposition d'huile isolante du transformateur s'accumulent dans la partie supérieure du conteneur Buchholz, ce qui provoque une chute du niveau d'huile dans celui-ci. La baisse du niveau d'huile signifie l'abaissement de la position du flotteur qui provoque l'inclinaison de l'interrupteur à mercure. Les contacts de cet interrupteur à mercure sont fermés et un circuit d'alarme est activé (fig. 3.23).

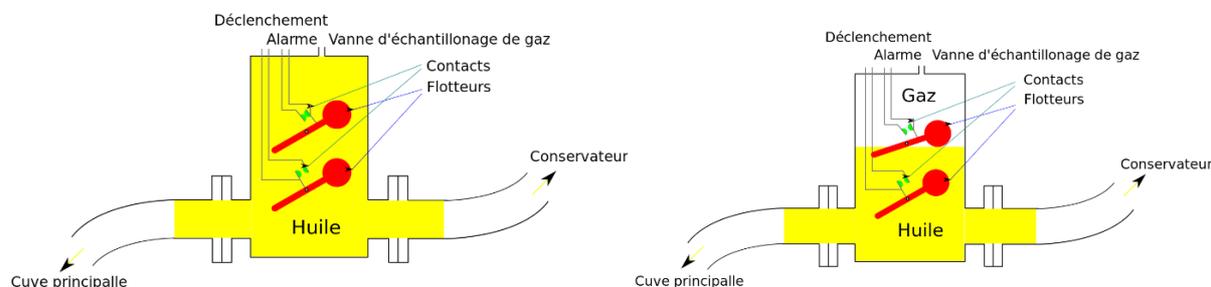


Figure 3.23 Schéma de principe du relais Buchholz

Pour des défauts plus graves, tels que les courts-circuits entre phases ou à la terre et les défauts dans l'équipement de changement de prise, s'accompagnent d'une poussée d'huile

qui frappe le déflecteur et provoque la fermeture de l'interrupteur à mercure de l'élément inférieur. Cet interrupteur a alimenté le circuit de déclenchement des disjoncteurs associés au transformateur et a immédiatement isolé le transformateur défectueux du reste du système d'alimentation électrique en déclenchant les disjoncteurs associés aux côtés BT et HT du transformateur.

Parfois, en raison d'une fuite d'huile sur le réservoir principal, des bulles d'air peuvent s'accumuler dans la partie supérieure du conteneur Buchholz, ce qui peut également provoquer une chute du niveau d'huile dans celui-ci et le circuit d'alarme sera activé. En collectant les gaz accumulés des poches de dégagement qui se trouvent sur le dessus du relais et en les analysant, on peut prédire le type de défaut dans le transformateur.

5.3 Jauge de température

Les grands transformateurs ont des dispositifs de mesure de la température de l'huile ou de l'enroulement. On distingue deux méthodes de mesurer, l'une est appelée mesure du point chaud et la seconde est appelée mesure de l'huile supérieure. La figure 3.24 montre une jauge typique avec un boîtier de contrôle de la température de transformateur immergé.



Figure 3.24. Jauge de température

Le boîtier comporte un cadran qui indique la température du transformateur (aiguille noire) et l'aiguille rouge indique le point de consigne de l'alarme. Le dispositif est configurable (4 flèches en bas), il permet l'enclenchement d'une alarme ou un déclencheur ou pour démarrer ou arrêter des pompes ou des ventilateurs de refroidissement.

5.4 Dispositifs de décharge de pression

Ce dispositif constitue une protection des transformateurs contre une pression interne excessive. En cas de défaut ou de court-circuit, l'arc électrique qui en résulte vaporise instantanément l'huile environnante, ce qui entraîne une augmentation rapide de la pression gazeuse. Si le dispositif de décompression ne fonctionne pas correctement et que la pression n'est pas suffisamment relâchée en quelques millisecondes, une rupture catastrophique du réservoir peut se produire, répandant de l'huile enflammée sur une large zone.

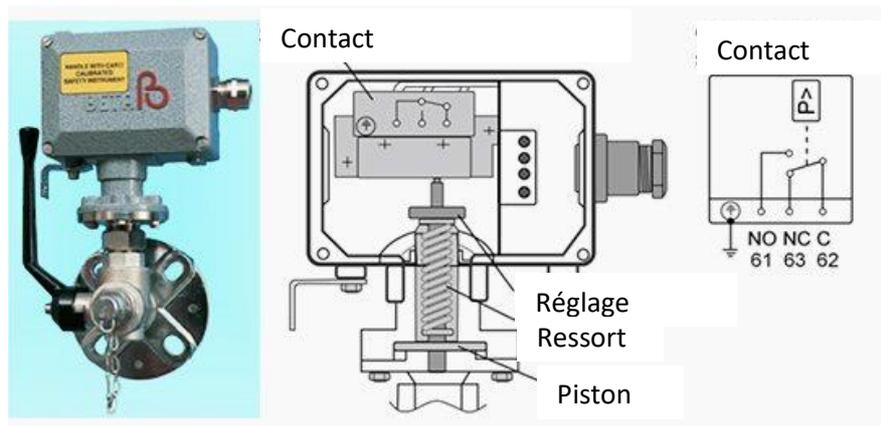


Figure 3.25. Relai de pression

5.5 Transformateurs d'instrumentation

Les transformateurs d'instruments sont utilisés à des fins de mesure et de contrôle (fig. 3.26). Ils fournissent des courants et des tensions proportionnels à ceux du primaire, mais ils présentent moins de danger pour les instruments et le personnel.

Les transformateurs utilisés pour abaisser la tension sont appelés transformateurs de potentiel (TP) et ceux qui servent à abaisser le courant sont connus sous le nom de transformateurs de courant (TC) ou transformateur d'intensité (TI).

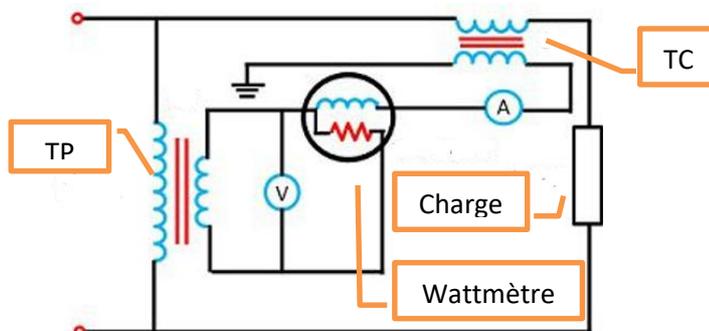


Figure 3.26. Montage de mesure de puissance avec transformateurs d'instruments

5.5.1 Transformateurs de potentiel

Les transformateurs de potentiel (figure 3.27) sont utilisés avec les voltmètres, les wattmètres, les compteurs d'énergie, les fréquencemètres, les synchroscopes et appareils de synchronisation, les relais de protection et de régulation et les bobines de déclenchement de sous-tension et de surtension des disjoncteurs.

Un transformateur de potentiel peut être utilisé pour un certain nombre d'instruments si le courant total requis par les instruments connectés à l'enroulement secondaire ne dépasse pas la valeur nominale du transformateur.

Les transformateurs de potentiel ont généralement une puissance nominale de 50 à 200 VA. Les bornes secondaires ne doivent jamais être court-circuitées car un courant important en résulterait, ce qui pourrait endommager les enroulements.



Figure 3.27. Transformateur de potentiel

5.5.2 Transformateur de courant

Un transformateur peut être équipé de transformateurs de courant placés dans les dômes des traversées (c'est-à-dire à leur pied). Sur les transformateurs de grande puissance, il y a souvent un transformateur de courant de mesure par phase (fig. 3.28). Les transformateurs de mesure de courant permettent de mesurer le courant traversant le transformateur. Ceux de protection communiquent des informations aux protections. Ils peuvent mesurer le courant avec une bonne précision même lorsque celui-ci dépasse de plusieurs facteurs d'ordre le courant nominal contrairement aux transformateurs de mesures qui ne sont précis que pour des valeurs proches de la valeur nominale.

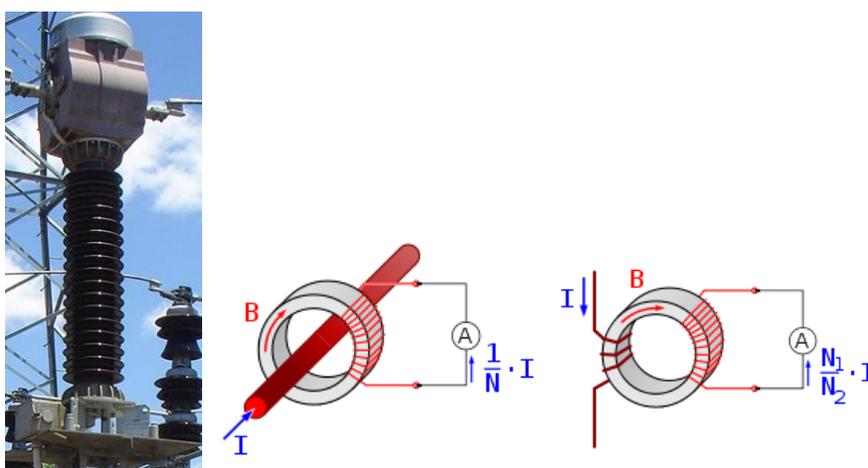


Figure 3.28. Principe d'un transformateur de courant avec une seule ou plusieurs spires au primaire

Chapitre IV

INSTALLATION ET ENTRETIEN DES TRANSFORMATEURS

1. Procédures d'installation

Les transformateurs électriques doivent être installés avec le plus grand soin et la plus grande précaution, sinon ils peuvent entraîner des dommages très graves. Mais il est important que l'opération soit conforme aux réglementations en vigueur et aux normes tel que ANSI/IEEE et NEMA.

Neuf facteurs à prendre en compte lors de la mise en place et du raccordement d'un transformateur.

1.1 Emplacement

Il faut penser à la sécurité électrique lors du choix du site de l'installation ; vous devez faire évaluer le terrain et le sol au préalable. Il ne doit pas y avoir d'exposition à des risques ou des menaces pour les équipements et le personnel.

Il faut s'assurer que le transformateur est placé dans la même direction que le fil d'entrée du bus haute et basse tension. De même, il faut analyser la structure de la charge pour vérifier l'intégrité de la conception structurelle. Dans le cas de zones sujettes aux séismes, des dispositions particulières doivent être prises pour éviter tout effondrement en cas de mouvement sismique.

Les équipements sont destinés à être installés dans des zones sécurisées généralement inaccessibles aux personnes non autorisées et non formées.

1.2 Ventilation

La ventilation doit être une priorité absolue pour les transformateurs électriques, en particulier les transformateurs de type sec. Ils doivent être situés dans un endroit suffisamment spacieux pour permettre à la chaleur de se dissiper rapidement et pour offrir un accès constant à de l'air propre et sec grâce à une ventilation adéquate.

Toutes les surfaces du transformateur doivent respecter les appropriées selon les codes locaux et être situées à au moins 15 centimètres de toute obstruction, sauf indication contraire. Un air propre et sec est le plus souhaitable. Si l'environnement est poussiéreux, alors des filtres peuvent être installés pour réduire la maintenance sur le transformateur.

Pour une meilleure ventilation, l'entrée d'air doit être aussi proche du sol que possible, la sortie se trouvant à l'opposé, près du plafond (fig. 4.1). Ces entrées et sorties doivent être ouvertes en permanence pour une ventilation continue. L'écart de température de l'air entrant et l'air sortant ne doit pas dépasser 15 °C. forcée doit être installée. De plus, la ventilation de la pièce ne doit pas interfère avec la circulation normale de l'air dans le transformateur. Le flux d'air doit être dirigé vers l'unité.

Lors de l'installation du transformateur, il est recommandé que les câbles d'alimentation arrivent par le bas et/ou le côté afin de ne pas bloquer les ouvertures de ventilation. Il faut s'assurer également que les ouvertures de ventilation sur le dessus et le dessous du boîtier sont dégagées.

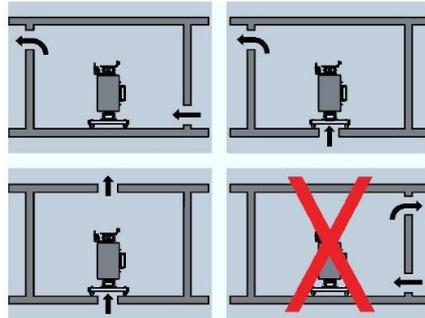


Figure 4.1. Recommandation de ventilation

1.3 Câblage d'installation sans armoire

Le transformateur possède des connexions pour les enroulements haute tension (HT-HV) et basse tension (BT- LV) qui sont clairement marqués.

Le câble côté haute tension peut être connecté au transformateur après avoir été disposé dans le chemin de câbles inférieur ou après avoir été disposé dans le chemin de câbles supérieur (fig. 4.2). La connexion côté basse tension peut se faire par câble ou par jeu de barres. Si la connexion par jeu de barres est utilisée, une transition de connexion douce est recommandée pour éviter l'impact mécanique sur l'enroulement basse tension et réduire le niveau de bruit pour des raisons structurelles. Les câbles installés par l'utilisateur doivent être maintenus aussi loin que possible des bobines et des pinces supérieures.

Avant de monter les traversées sur le transformateur, ils devraient être vérifiés pour tout dommage ou fissure. S'ils vont bien, ils doivent être nettoyés avec un chiffon en coton sec. Les coussinets sont normalement livrés sous forme assemblée complète. Lors du serrage de la bague sur le réservoir, il convient de veiller à obtenir une pression uniforme sur la bride de la porcelaine et son joint en serrant alternativement les écrous diagonalement opposés. La connexion électrique au goujon de la traversée doit être suffisamment souple pour absorber les vibrations. Si des guignols sont fournis avec la traversée, ils doivent être installés et l'écartement entre les guignols doit être réglé conformément au schéma fourni avec le transformateur.

Il est recommandé de n'effectuer que les connexions spécifiées par la plaque signalétique ou le schéma de connexion et de vérifier que tous les cavaliers de branchement sont en place. Il faut connecter solidement les cosses et la barre de terminaison. Une connexion incorrecte provoquera un échauffement et des arcs électriques, ce qui peut entraîner une défaillance de la connexion.

Lors de la connexion des jeux de barres, il faut vérifier l'alignement des joints avant serrage afin d'éviter une tension excessive sur les isolateurs. Des connexions de bus flexibles (généralement en option) peuvent être réalisées pour éliminer toute tension excessive aux points de connexion.

Les jeux de barres et les cosses doivent être nettoyés à fond avant d'effectuer une connexion. Avant le serrage ou la jonction des bornes, la couche d'oxyde (conducteur faible) qui n'est pas visible sur la surface de contact doit être nettoyée. Si la surface de contact est rugueuse et doit être polie (brossage, meulage, etc.), elle doit être nettoyée. Si l'une des surfaces de contact est démontée, les surfaces de contact doivent être nettoyées à nouveau avant le serrage.

Si le transformateur est installé dans une pièce sujette à la condensation ou contenant des gaz plus corrosifs, la surface de contact aluminium-cuivre doit être peinte pour protéger toute la surface de contact, en particulier les bords du contact. Si cette mesure de protection contre l'humidité n'est pas prise, une feuille composite aluminium-cuivre doit être installée entre les surfaces de contact, de sorte que la surface en aluminium soit reliée à la barre d'aluminium, et la surface en cuivre à la barre de cuivre.

Des pièces résistantes à la corrosion doivent être utilisées pour les assemblages par boulons. Il faut utiliser toujours deux clés pour serrer ou desserrer les connexions boulonnées afin de pour d'éviter tout dommage.

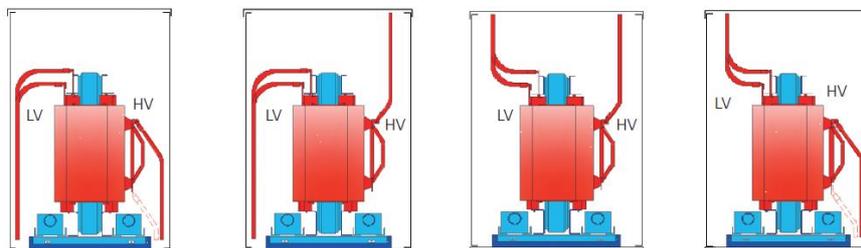


Figure 4.2. Passage des câbles

1.4 Mise à la terre

Toutes les parties métalliques non porteuses de courant d'un transformateur doivent être correctement mises à la terre. La mise à la terre est nécessaire pour éliminer la charge statique qui s'accumule dans le transformateur en dissipant la charge dans la terre.

Il est également important de vérifier la connexion de la mise à la terre des enroulements et du circuit magnétique, en cas de défaut d'isolement entre les enroulements et le noyau, le système est protégé.

1.5 Liste de contrôle "checklist"

Généralement le constructeur de transformateur, livre une liste de contrôle (checklist) électrique et mécanique recommandée à utiliser pour s'assurer que le transformateur est entièrement préparé pour la mise sous tension et le fonctionnement. Il est recommandé de suivre ces listes de contrôle lors de la mise en service initiale et également chaque fois que l'unité a été arrêtée pour maintenance ou pour des périodes prolongées. Ces listes de contrôle sont des procédures générales de démarrage et ne sont pas exhaustives.

Veillez contacter le fabricant pour toute questions ou des préoccupations après avoir suivi la liste de contrôle.

2. Les défaillances du transformateur électrique

Le transformateur est un appareil électrique qui a une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. Cependant en fonction de son utilisation, sa maintenance, sa charge, les perturbations qu'il subit, etc. il peut être sujet de défaillances plus ou moins importantes. Les pannes importantes sont rares mais souvent problématiques, en particulier par rapport à l'indisponibilité du matériel.

Selon l'historique d'exploitation des transformateurs de puissance de type poste avec régleur en charge, les principaux composants défaillants sont :

- Les enroulements 40 %
- Les régleurs en charge 35 %
- Les traversées 12 %

Les différents types de défauts ont des degrés de gravité variable en fonction des dommages causés et de leurs répercussions.

- Défaut à évolution lente et ne mettent pas en danger immédiat l'appareil (vibrations, décharges partielles). Il est possible, en étant averti, de différer opportun.
- Incidents susceptibles de produire des dégâts importants nécessitent une intervention immédiate et automatique (courts-circuits, amorçages internes).

Dans le pire des cas il est possible parfois d'aller jusqu'à l'explosion du transformateur (fig. 4.3).



Figure 4.3. Explosion de transformateur

2.1 Contrainte diélectrique

La contrainte diélectrique caractérise la tenue en tension des différents éléments du transformateur. Cette tenue diélectrique au sein du transformateur est liée à l'état isolant :

- du papier isolant les conducteurs ;
- de l'huile diélectrique immergeant l'ensemble de la partie active ;
- des traversées.

Si les caractéristiques des isolants se dégradent trop, due à une humidité interne excessive par exemple, ou sont contraintes au-delà de leurs limites alors il peut se développer :

- un **amorçage des pièces sous tension** :
 - **entre elles**, comme entre enroulements ou entre spires (fig. 4.4 et fig. 4.5)
 - **avec la masse**, comme l'amorçage d'une traversée ou d'un enroulement à la cuve ou au circuit magnétique.
- des **décharges partielles** au sein d'un isolant, classiquement solide dans les transformateurs. Ce sont des micro-décharges locales qui tendent à se propager dans le temps.

Tous ces défauts créent du carbone, qui est conducteur, impactant ainsi la tenue diélectrique localement. Ce phénomène étant irréversible, il est impossible de retrouver un fonctionnement normal suite à un amorçage diélectrique. Voici quelques-uns des défauts pouvant arriver sur les transformateurs.



Figure 4.4. Amorçage franc entre spires



Figure 4.5. Amorçage entre enroulements

2.2 Contraintes électrodynamiques et surintensités

Le passage du courant dans un conducteur, soumis à un champ magnétique, provoque une force de Laplace au sein de ce conducteur proportionnelle au carré du courant.

Pour un courant nominal les efforts mécaniques sont négligeables par rapport aux efforts liés aux courants de court-circuit (environ 100 fois plus importants), pour lequel le transformateur est dimensionné mécaniquement.

Les conséquences de ces surintensités sont principalement les **Efforts électrodynamiques** dus aux forces de Laplace dans les bobinages entraînant des contraintes mécaniques élevées. Ces efforts peuvent être particulièrement significatifs lors des efforts de court-circuit, jusqu'à quelques centaines de tonnes et peuvent endommager les enroulements et les accessoires de fixation (fig. 4.6).

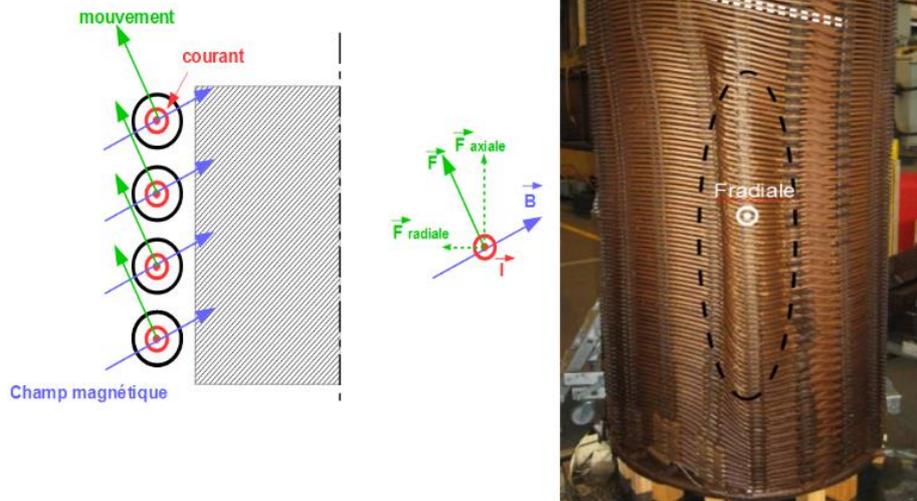


Figure 4.6. Effort électrodynamique franc

2.3 Contraintes électriques : mauvais contacts

Le courant passe à travers différents contacts dans un transformateur, souvent composés de métaux différents.

Les effets de ces contraintes électriques sont principalement des points chauds dus à des échauffements locaux anormaux sur les éléments suivants :

- **Connexions dans certains changeurs de prises en charge**, en particulier les contacts mobiles de l'inverseur s'ils sont peu manipulés, alors qu'ils voient passer en permanence le courant de charge du transformateur.
- **Connexions des changeurs de prise hors tension**. Les contacts mobiles sur les positions en service qui ne sont jamais bougés peuvent se dégrader avec le temps.
- **Connexion entre le cuivre des enroulements et une connexion interne**, comme pour les prises de réglage ou les connexions qui passent dans les traversées. Ces différentes connexions sont brasées, serties ou boulonnées, et suivant la qualité du contact et les conditions d'exploitation, certains de ces raccords peuvent chauffer anormalement. Un point chaud très avancé sur un contact boulonné est visible sur la Figure 4.7-a.

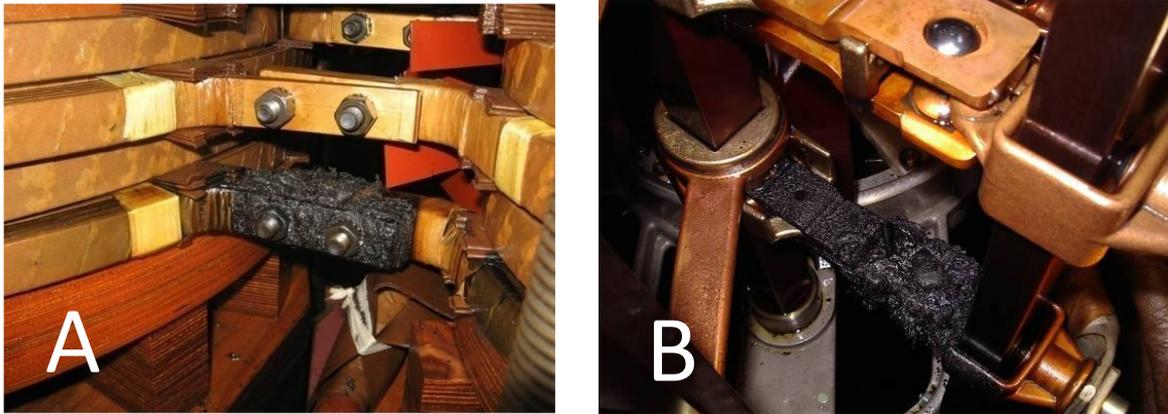


Figure 4.7. Point chaud : a) sur connexion boulonnée b) sur le sélecteur d'un régleur en charge

La formation de points chauds, constitués de particules de carbone solides dues à la décomposition de l'huile, peut dans certains cas provoquer la dégradation d'isolants. Dans les stades les plus avancés, la formation de carbone sous forme solide peut diminuer des distances diélectriques internes, allant jusqu'à un amorçage interne dans le pire des cas.

2.4 Contraintes thermiques : surcharges, points chauds et vieillissement

Les contraintes thermiques sont dues principalement aux pertes Joule liées au passage du courant dans les enroulements. Les contraintes thermiques provoquent **le vieillissement** :

- **des papiers isolants**, et la dégradation de leurs propriétés diélectriques. Par exemple dans le cas extrême de la Figure 4.8 toute la bobine est noircie de l'intérieur à cause d'un fonctionnement à des températures excessives.
- **de l'huile isolante**. La température, l'humidité et l'oxygène accélèrent le vieillissement de l'huile, qui perd donc ses qualités d'origine, ce qui peut mener à un défaut.



Figure 4.8. Echauffement excessif d'un enroulement

2.5 Contraintes électromagnétiques et courants de Foucault

Le passage d'un courant dans le transformateur induit un champ magnétique, qui à son tour induit des courants de Foucault dans les éléments métalliques du transformateur. Ces courants induits sont la cause majeure des pertes supplémentaires dans un transformateur.

En cas de mises à la masse en plusieurs points du circuit magnétique (fig. 4.9), ou des éléments métalliques de serrage de la partie active, on peut avoir comme défauts typiquement des points chauds dus à :

- **des courants de Foucault induits**, anormalement importants ;
- **des dégradations d'isolants internes** dus à ces courants de Foucault anormaux.

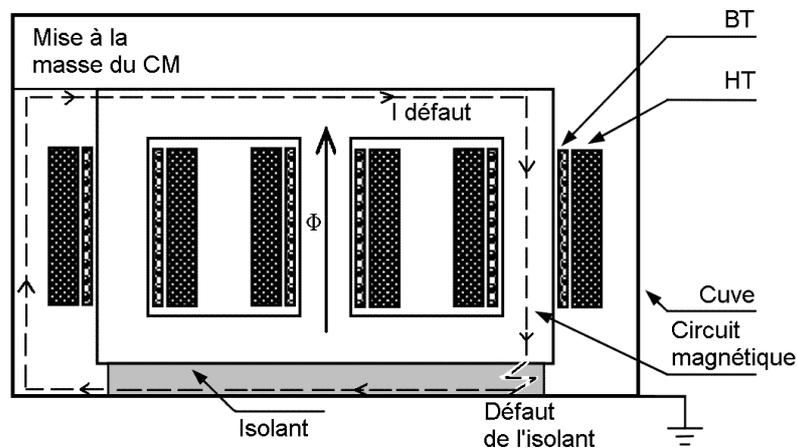


Figure 4.9. Schéma d'une boucle de courant de défaut avec le circuit magnétique (CM)

3. Maintenance des transformateurs

La mise en œuvre de la maintenance consiste à opérationnaliser la politique de maintenance établie. Elle consiste à l'application de différentes stratégies de maintenance (préventive et curative). Dans l'opérationnalisation de la maintenance d'un transformateur, les actions s'articulent autour de ses composantes. En effet, les composantes d'un transformateur peuvent se distinguer en deux groupes, les composantes externes et les composantes internes.

3.1 Maintenance des composantes externes du transformateur

La maintenance régulière des différentes composantes du transformateur de puissance est vitale pour sa vie, quel que soit son âge. Le tableau ci-dessous présente une synthèse d'actions de maintenances à entreprendre sur les composantes externes et leur périodicité.

| Composantes | Parties | Actions de maintenance | Périodicité | Observations |
|-------------|---------|------------------------|-------------|--------------|
|-------------|---------|------------------------|-------------|--------------|

| | | | | |
|-----------------------------------|---|---|---------------------------------|---|
| Système de ventilation | Moteur, pompe | Suivre les indications du constructeur | Annuelle | Un nettoyage par air ou par eau est possible suivant les recommandations du constructeur |
| Traversées | | Inspection | Annuelle | Niveau d'huile, étanchéité, cassure des ailettes sont à contrôler |
| Parafoudre | -Compteurs - Mise à la terre | Inspection | Mensuelle Annuelle | Vérification de la propreté, des connexions |
| Assécheur d'air | silicagel et autres. | Remplacement des charges de silicagel, Vérification du niveau d'huile dans l'assécheur, et des joints | Annuelle ou selon la coloration | Empêche l'humidité de l'air d'être en contact avec l'huile quand la charge ou la température changent. |
| Changeur de prises | -Sélecteurs -Commutateur | -Inspection -Analyse d'huile | Annuelle | Toutes les 50 000 manœuvres (ou 5 ans), révision complète du régleur avec échange des pièces suivant besoin (contact, résistance de passage). |
| Connexion de puissance | Commutateurs | Inspection thermographique | Annuelle | Manœuvrer hors tension |
| Appareillage de protection | -Différents capteurs, -Relais Buchhoz, Disjoncteurs et éléments de signalisation | Inspection | Annuelle | Vérification de fonctionnement |
| Armoires auxiliaires | Matériels électriques | Inspection | Annuelle | Contrôle des connexions, d'échauffement anormal, intrusion diverse etc. |

3.2 Maintenance des composantes internes du transformateur

Les composantes internes d'un transformateur sont constituées : du noyau magnétique, des bobinages et du système d'isolation.

Le noyau magnétique et le bobinage peuvent être sujets aux courts - circuits et autre contraintes mécaniques qui conduisent aux déformations de leur structure.

Le système d'isolation, constituée d'une partie solide et d'une partie liquide subit des contraintes électriques pouvant développer des défauts conduisant à la défaillance du transformateur. En effet, la partie liquide est constituée d'une huile isolante dans laquelle baignent tous les autres éléments internes du transformateur. Elle constitue dans le cadre de la maintenance, la mémoire des défauts qui engagent les parties internes du transformateur. Les différentes contraintes que subit le transformateur laissent donc des traces dans cette huile. Lorsqu'elle est analysée, elle révèle des défauts qui peuvent attester de l'état de santé interne du transformateur. Le tableau ci-après résume les différentes analyses à effectuer dans le cadre du diagnostic des transformateurs ou plus précisément, de la recherche des défauts (signes) qui enclencheraient des actions de maintenance préventive ou d'autres formes d'analyses poussées.

La partie solide de l'isolation quant à elle, est constituée du papier ou des couches de papier disposées entre les enroulements et la cuve et entre les bobines. Elle baigne dans l'huile et sous la contrainte de la chaleur, elle se dégrade en produisant des composés chimiques détectables par analyse. Ces composés donnent une indication sur l'état du papier dans le transformateur. Il est aussi possible de faire une analyse du degré de polymérisation sur un échantillon de papier. Le prélèvement dans ce cas exige la mise à l'arrêt du transformateur. À partir de l'analyse des composés uraniques, une estimation du degré de polymérisation du papier est possible.

| Analyses d'huile | Détails | Périodicité | Observations |
|---|---|--|--|
| Analyses physico Chimiques | -Rigidité diélectrique - Teneur en eau -Colorimétrie -Indice d'acidité | Annuelle | La périodicité peut être réduite si une des grandeurs s'approche des seuils limites admissibles. |
| Analyse Chromatographique Des Gaz Dissous. | Les gaz sont séparés et les concentrations analysées par des méthodes bien connues. Généralement, chaque gaz ou groupe de gaz est lié à un type de défaut | Initialement annuelle, elle peut être bi ou tri-annuelle en fonction des résultats et de l'âge du transformateur | Il est réalisé, le matériel étant de préférence en service, le plus rapidement possible après la mise hors tension. La température d'huile au moment du prélèvement doit être notée. |
| Analyse des Furfurals | Les composés Furaniques renseignent sur l'état du papier | Pour les appareils de plus de 10 ans, tous les 2 ans | Interprétation et actions selon la norme CEI 1198 |
| Analyses Complémentaires | Il est recommandé de faire: | Au vu des résultats des analyses | |

| Analyses d'huile | Détails | Périodicité | Observations |
|------------------|---|---|--------------|
| | <ul style="list-style-type: none"> – les analyses de sédiment (en cas de boue) – les analyses des métaux (point chaud haute température) – le comptage de particules (pour transformateur > 400 kV) | physico-chimiques et chromatographiques | |

3.3 Inspection

3.3.1 Fréquence des inspections

Elle est imposée par le règlement sur les installations électriques en vigueur dans le pays où le transformateur est exploité, mais le constructeur recommande une périodicité de 12 mois au moins.

3.3.2 Inspection de routine

Lors d'une inspection, il est vivement recommandé de faire spécialement attention aux points suivants :

- les indications de tous les compteurs et dispositifs de mesure ;
- les niveaux indiqués par les jauges d'huile ;
- la température de l'huile affichée par le thermomètre installé sur le couvercle du transformateur ;
- la charge du transformateur (valeur du courant) ;
- l'état des dispositifs auxiliaires ;
- l'état des traversées ;
- l'état des raccordements aux dispositifs de protection ainsi que celui des dispositifs de protection eux-mêmes ;
- les conditions ambiantes en s'intéressant spécialement à la température.

Il est aussi nécessaire de prendre note :

- de l'état des bornes de traversée ;
- de toute anomalie du son produit par le transformateur
- des éventuelles traces d'huile sous le transformateur.

3.3.3 Fonctionnement anormal du transformateur

En cas de dommage ou de perturbations entravant son fonctionnement normal, on mettra le transformateur hors circuit et on procédera à une inspection en urgence. On donne ci-dessous une liste de causes types réclamant une telle inspection :

- fuite/perte d'huile ;
- tout endommagement bien apparent des traversées ;
- toute modification facilement perceptible de l'intensité du bruit produit par le transformateur ;
- un échauffement excessif des câbles de raccordement ;
- une hausse de la température indiquée par le thermomètre situé sur le couvercle, au-delà des quelque 105 °C préconisés

3.4 Maintenance d'un transformateur inutilisé

On prendra note des consignes suivantes :

- les transformateurs inutilisés doivent être entretenus de la même façon que des transformateurs en service ;
- il ne faut jamais démonter un transformateur ;
- le niveau d'huile doit être vérifié tous les six mois ;
- on pratiquera un examen visuel au moins une fois par an ;
- on mesurera l'isolation et on analysera l'huile comme si le transformateur était en service ;
- les parties et éléments fragiles doivent être protégés ;
- toutes les extrémités métalliques doivent être enduites de graisse anticorrosion ;
- l'accès des personnes non autorisées au transformateur sera restreint.

Les diagnostics et les fréquences ci-dessous sont donnés à titre indicatif et dépendent de l'application, de l'intensité, de l'environnement et de l'état de l'équipement.

| | 1re année | | +1 mois | +1 an | +5 ans | +10 ans | +20 ans | Relocalisation |
|---|--------------|---------------------------|---------|-------|--------|---------|---------|----------------|
| | Après 3 mois | Après 1 an ⁽¹⁾ | | | | | | |
| 1. Opérations générales | | | | | | | | |
| 1.1 – Inspection visuelle (peinture, corrosion, etc.) | | | | M | | | | |
| 1.2 – Température de l'huile (avec valeur max.) | M | | M | | | | | |
| 1.3 – Température de l'enroulement (avec valeur max.) | M | | M | | | | | |
| 1.4 – Courant HT, BT (avec valeur max.) | M | | M | | | | | |
| 1.5 – Tension HT, BT (avec valeur max.) | M | | M | | | | | |
| 2. Huile | | | | | | | | |
| 2.1 – Eau dans huile (évolution) | | M | | M | | | | M |
| 2.2 – Analyses des gaz dissous ⁽¹⁾ , physique-chimique | M | | | M | | | | M |
| 2.3 – Fuites, niveaux | | M | | M | | | | M |
| 2.4 – Filtrage et dégazage | | | | | | M | | M |
| 2.5 – Séchage et reconditionnement/récupération | | | | | | | M | M |
| 3. Evaluation de la partie active | | | | | | | | |
| 3.1 – Intégrité mécanique | | | | | | M | | M |
| 3.2 – Intégrité diélectrique | | | | | | M | | M |
| 3.3 – Intégrité des pièces principales | | | | | | M | | M |
| 3.4 – Inspection interne | | | | | | | M | M |
| 3.5 – Resserrage | | | | | | | M | M |
| 4. Composants | | | | | | | | |
| 4.1 – Pièces principales | | | | M | | | | M |
| 4.2 – Traversées HT, BT ⁽¹⁾ | | | | M | | | | M |
| 4.3 – Joints toriques, joints | | | | M | | M | | M |
| 4.4 – Changeur de prises hors tension (DETC) | | | | | | | | |
| 4.4.1 – Inspection visuelle | | M | | M | | | | M |
| 4.4.2 – Vérification interne | | | | | M | | R | |
| 4.5 – Changeur de prises en charge ⁽¹⁾ | | | | | | | | |
| 4.5.1 – Inspection visuelle | | M | | M | | | | M |
| 4.5.2 – Vérification interne ⁽¹⁾ | | | | | M | | R | |
| 4.6 – Entraînement de changeur de prises en charge | | | | | | | | |
| 4.6.1 – Inspection visuelle | | M | | M | | | | |
| 4.6.2 – Vérification interne | | | | | M | | R | M |
| 4.7 – Pompes à huile | | | | M | | | R | M |
| 4.8 – Refroidisseurs/Echangeurs thermiques | | | | M | | | | M |
| 4.9 – Température ambiante | M | | M | | | | | M |
| 5. Accessoires | | | | | | | | |
| 5.1 – Relais à gaz, surpression | | M | | M | | | R | M |
| 5.2 – Dessiccateurs | | M | | M | | | R | M |
| 5.3 – Thermomètres | | M | | M | | | R | M |
| 5.4 – Valves | | M | | M | | | R | M |
| 5.5 – Armoire de contrôle | | M | | M | | | R | M |
| 5.6 – Vase d'expansion | | M | | M | | | R | M |

⁽¹⁾ Inspection intermédiaire (6 mois) pour les éléments critiques (GSU, industriel, réacteurs, etc.)
⁽²⁾ Selon le modèle et la durée utile
Remarques:
⁽¹⁾ Possibilité de surveillance en ligne
M = Maintenance et diagnostic ; R = Remplacement

Remise à neuf en milieu de vie / Usine / TratoSiteRepair™
Hors service – Déconnecté
Hors service – Connecté
En service

N'hésitez pas à contacter votre spécialiste ABB local.

ABB Ltd. – Transformer Services
Affolternstrasse 44
P.O. Box 8131
8050 Zürich
Suisse

Power and productivity
for a better world™ **ABB**

Bibliographie

- Michel Lambert, *Les transformateurs électriques : Fonctionnement, mise en œuvre et exploitation*, Edition DUNOD, Mars 2016
- Mohamed Boughal, *Diagnostic des Transformateurs de Puissances*, Presses Académiques Francophones, Mars 2014
- James H. Harlow, *Electric power transformer engineering*, CRC Press, 2004
- S. V. Kulkarni et S. A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design and Practice*, New York, Marcel Dekker, 2005
- Lahcene Bouchaoui, Kamel Eddine Hemsas, Saad-Eddine Benlahneche, *Diagnostic des transformateurs de puissance*, Editions universitaires européennes, 2013
- Théodore Wildi, *Electrotechnique*, DeBoeck, 2003
- *Le Transformateur de puissance*, Tec & Doc, 1999
- *Transformers: Basics, Maintenance, and Diagnostics*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado, April 2005
- IEC 60076-1 – Power transformers – Part 1 General
- IEC 60076-2 – Power transformers – Part 2 Temperature rise
- IEC 60076-3 – Power transformers – Part 3 Insulation levels dielectric tests and external clearances in air
- IEC 60076-5 – Power transformers – Part 5 SC test
- *Guide de la distribution électrique basse tension et HTA*, de B92 à B106, Schneider Electric, - 2009